

68858

DE GRAZIA, J
Dinámica de la Mater

2010

68858



CREA. CREA. CREA

*Universidad Nacional de Río Cuarto
Facultad de Agronomía y Veterinaria*

T.658



Dinámica de la Materia Orgánica como Indicador de Sustentabilidad de los Agroecosistemas de la Región Central de Argentina

Empleo de Modelos Matemáticos de Simulación

Autor: Javier De Grazia

Director: Ing. MSc. José Manuel Cisneros

Tesis de Maestría en Ciencias Agropecuarias

**Escuela de Posgraduación
Facultad de Agronomía y Veterinaria
Universidad Nacional de Río Cuarto**

Noviembre de 2010

68858

MFN:
Clasif: T-658

Direcciones de contacto:

Javier De Grazia	Cátedra de Edafología, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Lomas de Zamora, Ruta Provincial n° 4 km 2, Llavallol (CP 1836), Provincia de Buenos Aires, Argentina. Tel/Fax: (0054) 4282-6263. E-mail: degrazia@agrarias.unlz.edu.ar
José Manuel Cisneros	Cátedra de Uso y Manejo de Suelos, Facultad de Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Río Cuarto. Estafeta Postal n° 9. Ruta Provincial n° 36 km 601, Río Cuarto (CP 5800), Provincia de Córdoba, Argentina. Tel/Fax: (0358) 468-0280. E-mail: jcisneros@ayv.unrc.edu.ar

A Soledad, Lucía y Camila

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mi director, el Ing. MSc. José Cisneros, por su invaluable aporte durante el desarrollo de las distintas etapas de esta tesis y por su permanente apoyo en los momentos difíciles que me tocó vivir. En segundo lugar, quiero expresar mi agradecimiento a la Ing. MSc. Estela Bricchi, quien prácticamente ofició de co-directora, brindando su apoyo incondicional en todo momento, aportando su "ojo clínico" en la selección e identificación de los sitios a muestrear, y hasta colaborando en la toma de muestras a campo y su análisis en laboratorio. Además, a quien debería figurar como co-autor de esta tesis, mi gran amigo, el Dr. Pablo Tittone, con quien pensamos, diseñamos, ejecutamos y evaluamos en forma conjunta el contenido de este trabajo. Por otra parte, quiero agradecerle al Ing. Juan Carlos Ceriani, quien no sólo me inició en el estudio de las Ciencias del Suelo con su particular perspectiva, sino que también me transmitió la pasión por la Docencia y la Investigación.

Quisiera agradecer a todos aquellos que brindaron su desinteresada colaboración y que sin ellos no hubiera sido posible la realización de este trabajo. Al Geol. Peña Zubiate por el esclarecimiento sobre los procesos geomorfológicos de la región; al Ing. MSc. Mauro Uberto por brindar información sobre el uso del instrumental de campo; a la Ing. Stella Bogino por los aportes sobre los aspectos del Caldenal puntano; a los Ing. Ileana Paladino y Pablo Veronés por su colaboración en la toma de muestras de suelo y su análisis en laboratorio. Por otra parte, agradezco a los Sres. Bogino, Bonnavardo, Rodrigo y a todas aquellas personas que nos abrieron las puertas de sus establecimientos y nos permitieron realizar los relevamientos de suelos y florísticos.

Por último, quiero agradecer profundamente por la paciencia y comprensión, a las personas a quienes privé del tiempo que les correspondía, para dedicárselo a la elaboración de esta tesis. Luli –siempre vas a estar en mi corazón-; Cami –gracias a vos pude seguir adelante-; Sole –sin vos, esta tesis, mi trabajo y mi vida, no tienen sentido-.

Índice General

Contenido	Página
Agradecimientos	4
Resumen	9
Summary	10
Capítulo 1: Introducción	11
1.1 Presentación del problema	11
1.2 Utilidad del aporte de la tesis	15
1.3 Objetivos	16
1.3.1 General	16
1.3.2 Específicos	16
1.4 Hipótesis de Trabajo	17
Capítulo 2: La materia orgánica como indicador de la sustentabilidad	19
2.1 Evaluación de la sustentabilidad	19
2.2 Instrumentos de evaluación: medidas e indicadores	20
2.3 Métodos de evaluación	22
2.4 Antecedentes sobre el desarrollo de modelos de materia orgánica	24
Capítulo 3: El Modelo Century Agroecosystems	27
3.1 Introducción	27
3.2 Estructura interna y requerimientos de información	28
3.3 Marco conceptual	29
3.3.1 El sub-modelo de materia orgánica	29
III.3.1.1 <i>Balances hídricos, lixiviación y régimen térmico del suelo</i>	33
3.3.2 Los sub-modelos de producción de biomasa	35
3.3.2.1 <i>Producción del pastizal y pastoreo</i>	36
3.3.2.2 <i>Bosques y sabanas</i>	40
3.3.3 El sub-modelo de nitrógeno	43
Capítulo 4: Caracterización regional	47
4.1 Selección y descripción de las situaciones a estudiar	47
4.2 El área de trabajo	49
4.3 Caracterización agroecológica de las sub-regiones	51
4.3.1 Llanuras bien drenadas	52
4.3.1.1 <i>Diferenciación geomorfológica interna, origen y granulometría de los sedimentos</i>	53
4.3.1.2 <i>Aspectos climáticos</i>	54
4.3.1.3 <i>Hidrología</i>	55
4.3.1.3.1 Ríos y arroyos	55
4.3.1.4 <i>Formaciones vegetales originales y actuales</i>	56
4.3.1.5 <i>Los tipos de suelo más frecuentes</i>	57
4.3.1.6 <i>Evolución en el patrón de uso de la tierra</i>	58
4.3.2 Llanuras mal drenadas	59
4.3.2.1 <i>El origen de los sedimentos, la evolución del paisaje y su funcionalidad</i>	61
4.3.2.2 <i>Aspectos climáticos</i>	62

4.3.2.3 <i>Hidrología</i>	63
4.3.2.4 <i>Formaciones vegetales</i>	64
4.3.2.5 <i>Tipos de suelo desarrollados en la sub-región</i>	65
4.3.2.6 <i>Patrón de uso de la Tierra</i>	66
4.3.3 Llanuras medanosas	67
4.3.3.1 <i>Gradientes geológicos y geomorfológicos</i>	70
4.3.3.2 <i>Aspectos climáticos</i>	71
4.3.3.3 <i>Hidrología</i>	72
4.3.3.3.1 Ríos y arroyos	72
4.3.3.3.2 Lagunas	72
4.3.3.4 <i>Las formaciones vegetales</i>	73
4.3.3.5 <i>Tipos de suelo en la sub-región</i>	74
4.3.3.6 <i>Patrón principal de uso de la tierra</i>	75
4.3.4 Área serrana y pedemontana	77
4.3.4.1 <i>Geología y geomorfología</i>	77
4.3.4.2 <i>Aspectos climáticos</i>	80
4.3.4.3 <i>Hidrología</i>	80
4.3.4.4 <i>Las formaciones vegetales</i>	80
4.3.4.5 <i>Suelos</i>	82
4.3.4.6 <i>Patrón de uso de la tierra</i>	83
Capítulo 5: Aspectos metodológicos	85
5.1 Introducción	85
5.2 Fuentes de información	86
5.2.1 Información climática	86
5.2.2 Variables edáficas	88
5.2.2.1 <i>Información disponible</i>	88
5.2.2.2 <i>Generación de información</i>	89
5.2.3 Tipos de vegetación	92
5.2.4 Historia de uso y manejo	92
5.3 Caracterización de los sitios	93
5.3.1 Atributos del paisaje	93
5.3.2 Variables edáficas	96
5.3.3 Variables climáticas	97
5.4 Diseño de las simulaciones	107
5.4.1 Definición de los agroecosistemas	107
5.4.2 Definición de situaciones de uso y manejo	110
5.4.2.1 <i>Situación Potencial</i>	110
5.4.2.2 <i>Situación Natural</i>	110
5.4.2.3 <i>Situación Actual</i>	111
5.4.3 Alternativas de manejo de corto y mediano plazo	112
5.5 Análisis y procesamiento de información y resultados	113
5.5.1 Factores de control sobre los niveles de carbono y propiedades derivadas	113
5.5.2 Evaluación de los resultados de las simulaciones	114
5.5.3 Análisis de sensibilidad	114
5.5.4 Efectos del uso y manejo	115
5.5.5 Efectos del Cambio Climático Global	115
Capítulo 6: Resultados y discusión	117
6.1 Ponderación de las variables del modelo	117

6.1.1	Gradiente textural	117
6.1.2	Gradiente climático	132
6.1.3	Relación con algunas propiedades del suelo	137
6.2	Grado de ajuste del modelo Century	146
6.2.1	Grado de ajuste general para toda la región bajo estudio	146
6.2.2	Grado de ajuste para las distintas sub-regiones	149
6.2.2.1	<i>Grado de ajuste en condiciones naturales</i>	151
6.2.2.1	<i>Grado de ajuste en condición actual</i>	152
6.3	Planteo de escenarios futuros	153
6.3.1	Escenarios de uso y manejo de las tierras	153
6.3.2	Escenarios de cambio climático	173
6.4	Secuestro de CO₂ atmosférico y calidad ambiental	183
Capítulo 7:	Discusión general, recomendación y conclusiones	189
7.1	Conclusiones	191
Bibliografía citada		195
Anexos		215
I.	Parámetros y funciones del modelo Century	215
II.	Caracterización agroecológica de las sub-regiones bajo estudio	222
II.1	Subdivisión regional por asociaciones geomorfológicas	222
II.2	Aspectos geológicos, geomorfológicos e hidrológicos	223
II.3	Información climática	229
II.4	Formaciones vegetales	233

Resumen

La evaluación de la sustentabilidad de los agroecosistemas exige reunir ciertas características deseables en materia de indicadores: (a) las mediciones deben ser técnicamente factibles y fáciles de realizar, (b) deben concentrarse sobre aquellas variables relevantes ante las cuales el sistema muestra una particular sensibilidad, (c) deben ser representativas en términos de cobertura geográfica, (d) deben facilitar su incorporación a series temporales que permitan examinar cambios ocurridos en la calidad de los recursos naturales a través del tiempo, (e) deben permitir diferenciar claramente las causas de los efectos, y (f) deben ser poco costosas y eficaces en el aprovechamiento de información disponible. La materia orgánica del suelo resulta ser un adecuado indicador de la sustentabilidad de la componente edáfica de los sistemas productivos, a través de su cuantificación en el estado estacionario y como expresión del grado de deterioro del sistema bajo las condiciones actuales. El análisis de la evolución de la materia orgánica bajo diferentes situaciones de uso y manejo de las tierras en las distintas sub-regiones estudiadas en esta tesis, permite estimar el impacto que las mismas ejercen sobre la calidad y salud edáfica, de acuerdo a las características particulares de resistencia y resiliencia de cada una de ellas. La utilización de modelos de simulación en el análisis y cuantificación de la evolución de la materia orgánica edáfica bajo condiciones locales permite un gran ahorro de recursos (tiempo y dinero) en la investigación y transferencia de conocimientos. En este trabajo, se evalúa la dinámica de la materia orgánica edáfica como indicador de sustentabilidad bajo diferentes condiciones ambientales, de uso y manejo en la región central de Argentina, mediante la utilización del modelo Century. El mismo, fue sensible a los gradientes geocológicos y de uso y manejo regionales, siendo satisfactoriamente empleado para balances de C de largo plazo. Sin embargo, en la evaluación de la sustentabilidad en sitios bajo condiciones de intrazonalidad o de determinadas prácticas de manejo, es necesario complementar el uso del modelo Century con otros más sensibles a la dinámica del C orgánico en el corto plazo y/o considerar las variaciones cualitativas de la materia orgánica. Los resultados muestran que: (1) La simulación bajo distintos escenarios futuros de uso y manejo de las tierras permite predecir la evolución del contenido y calidad de la materia orgánica, y establecer rangos de referencia para la elección de sistemas de manejos productivos y estables, y por ende sustentables. (2) La simulación de la materia orgánica edáfica bajo diferentes escenarios climáticos permite predecir su posible evolución frente a las diferentes hipótesis de cambio climático global, y analizar sus consecuencias prácticas sobre los parámetros de calidad del suelo. (3) La simulación de la materia orgánica edáfica permite evaluar la capacidad de fijación de CO₂ atmosférico en el suelo de los diferentes sistemas de uso y manejo de las tierras, disminuyendo su concentración en la atmósfera y por ende los efectos del calentamiento global. Por último, en una evaluación integral de la sustentabilidad, los agroecosistemas deben ser re-diseñados en función de las necesidades de los diferentes actores involucrados teniendo en cuenta aspectos sociales, económicos y políticos. El modelo Century, complementado con otras herramientas metodológicas de evaluación a diferentes escalas espacio-temporales, puede ser de gran utilidad en el definición de políticas a escala regional.

Palabras clave: sustentabilidad, agroecosistemas, modelos de materia orgánica, Century, calidad y salud del suelo, secuestro de C.

Summary

Dynamics of the Organic Matter as Indicator of Sustainability of the Agricultural Ecosystems of the Region Central of Argentina. Employment of Mathematical Simulation Models.

Evaluation of the sustainability of agroecosystems requires meet certain desirable indicators concerning characteristics: (a) measurements should be technically feasible and easy to make, (b) should concentrate on those relevant variables to which the system displays a particular sensitivity, (c) must be representative in terms of geographical coverage, (d) should facilitate their inclusion in order to examine changes in the quality of the natural resources of time time-series, (e) should allow to clearly differentiate the causes of the effects, and (f) must be little expensive and effective use of available information. Soil organic matter turns out to be an adequate indicator of the sustainability of the soil component of productive systems on its quantification in steady state and as an expression of the degree of deterioration of the system under the current conditions. Analysis of the evolution of organic matter under various conditions of use and management of land in the various sub-regions studied in this thesis, allows you to estimate the impact them exercised on quality and soil, health according to the particular characteristics of resistance and resilience of each one. Using simulation in the analysis and quantification of soil organic matter under local conditions evolution models allows substantial savings of resources (time and money) in research and knowledge transfer. In this work, it evaluates the dynamics of soil organic matter as an indicator of sustainability under different environmental conditions, use and management in the central region of Argentina, through the use of the Century model. The same was sensitive to geocológicos gradients and regional, was successfully used for balance sheets C long-term use and management. Without however, in the assessment of sustainability at sites under conditions of intrazonality or certain practices of handling, it is necessary to supplement the use of the Century model with others more sensitive to the dynamics of organic C short-term and/or consider qualitative variations of organic matter. The results show that: (1) the simulation under different future scenarios of use and land management allows you to predict the evolution of the content and quality of organic matter and establish sustainable for the election of productive and stable handling systems, and therefore reference ranges. (2) Simulation of soil organic matter under different climate scenarios allows you to predict its possible evolution vs. different scenarios of global climate change, and analyze their practical consequences on soil quality parameters. (3) Soil organic matter simulation allows you to assess the fixation of atmospheric CO₂ in the soil of different systems use and management of land, decreasing its concentration in the atmosphere and therefore the effects of global warming. Finally, a comprehensive assessment of sustainability, agroecosystems must be re-designed depending on the needs of the different actors involved taking into account social, economic and political aspects. The Century, model supplemented by other methodological tools of evaluation at different scales space-time, can be very useful in the definition of policies at regional level.

Key words: sustainability, agroecosystems, organic matter models, Century, soil quality and health, C sequestration.

Capítulo 1: Introducción

1.1 Presentación del problema

El concepto de sustentabilidad, más allá de ciertas discrepancias entre autores, es concebido en forma unánime como el mantenimiento de ciertas condiciones favorables de los sistemas productivos en un nivel aceptable a través de un horizonte temporal determinado (Eswaran, 1994), y concierne en general a los aspectos ambientales, sociales, económicos y productivos del uso de las tierras (Smyth & Dumanski, 1995).

Existe, en la actualidad, una tendencia creciente en considerar el agroecosistema como un organismo vivo que está expuesto a la posibilidad de enfermar o sanar. De esta manera, un agroecosistema sustentable es aquél que goza de “buena salud”, en tanto que la pérdida de su sustentabilidad puede connotar distintos grados de “enfermedad”. Diagnosticar el “estado de salud” del sistema es la condición necesaria para prevenir o curar “enfermedades” potenciales o actuales (Viglizzo, 1996). Esta idea nos lleva de la mano a plantear una diferencia conceptual entre evaluar y medir la sustentabilidad en agricultura, equivalente a lo que en medicina permite diferenciar el control de algunas variables orgánicas, del diagnóstico sobre el estado de salud del organismo controlado en su conjunto. El control va asociado a la medición, o sea, al registro del dato necesario. El diagnóstico, en cambio, va asociado a la evaluación de la condición o estado del sistema como un todo. O sea, es una instancia ulterior que supone reunir las mediciones obtenidas, analizarlas e interpretarlas en un contexto más amplio. El mero hecho de medir no significa evaluar; para evaluar es necesario incorporar a la medición un proceso intelectual posterior que permita explicar la realidad observada en forma valorativa, con un alcance más amplio y global.

El concepto de desarrollo sustentable es relativamente reciente, ya que la propia idea de desarrollo ha ido variando en el tiempo.

La visión de lo que se debe entender como “desarrollo” sufrió tres cambios importantes desde las post-guerra (Conway & Barbier, 1990). La primera fase de ese cambio ocurrió durante la década de 1950, en la cual la idea de desarrollo aparece asociada a un crecimiento económico sostenido que debía reflejarse en un indicador macroeconómico ampliamente difundido: el Producto Bruto Nacional per Cápita. Sin

embargo, este indicador no pasaba de ser un número promedio que, como tal, no resultaba útil para los países menos desarrollados dado que no ayudaba a corregir problemas de inequidad porque no reflejaba qué proporción de la población se hallaba debajo de la línea de extrema pobreza. Reconocidas estas deficiencias, en las décadas de 1960 y 1970 ocurre una segunda fase de cambios en la idea de desarrollo, en la cual, se hablaba de “crecimiento con redistribución” y la agricultura era elegida como sector prioritario para eliminar el hambre y la malnutrición, absorber el empleo, y equilibrar balanzas de pago. El modelo agrícola de la Revolución Verde fue el instrumento elegido para satisfacer esa visión del desarrollo. Con este modelo se incorporaron variedades de alto rendimiento, madurez temprana e insensibilidad al fotoperíodo, y un uso intensivo de insumos (fertilizantes, pesticidas, riego y maquinaria). La incorporación de estas innovaciones ocurrió en las regiones agro-climáticas más favorecidas y fue muy exitoso en corregir las hambrunas que ocurrían en muchas regiones poco desarrolladas del planeta, pero no lograba corregir problemas básicos de inequidad social y comenzaba a dejar secuelas indeseables para el ambiente. Los paquetes tecnológicos que se usaban comenzaron a mostrar señales de respuestas decrecientes, debido a que los monocultivos se tornaron inestables frente a la escasez de insumos básicos, y debido a la proliferación de plagas que se expandían rápidamente en ambientes modificados de alta uniformidad genética. A ello había que sumar secuelas de degradación del ambiente no previstas, como la erosión de los suelos, la salinización, la pérdida de biodiversidad, y la contaminación de aguas, suelo y aire.

Frente a la complejidad de estos problemas y a las limitaciones que mostraba el paradigma de la Revolución Verde, comenzaron a surgir en la década de 1980 algunas ideas que evolucionaron hasta lo que hoy se conoce como Desarrollo Sustentable.

Existen muchas definiciones de Desarrollo Sustentable y de la aplicación del mismo a distintos campos. Quizás una de las más utilizadas sea la que surge del denominado Informe Brundtland (WCED, 1987). En él se define como Desarrollo Sustentable a un proceso en el cual la explotación de los recursos, el desarrollo tecnológico, y el cambio institucional, estén en armonía con el ambiente, y satisfagan equitativamente las necesidades actuales sin comprometer las posibilidades de las generaciones futuras para satisfacer las propias.

Aplicadas al campo agropecuario aparecen tanto definiciones conceptuales como operativas. Conway (1987) define la sustentabilidad en agricultura como la capacidad de

un potrero o parcela, de un campo, o de una nación, para mantener la productividad a través del tiempo frente a un disturbio externo de considerable magnitud. Graham-Tomasi (1991), por su parte, define la sustentabilidad como una administración exitosa de los recursos en agricultura para satisfacer necesidades humanas cambiantes, mientras mantiene o acrecienta la calidad del ambiente y conserva los recursos naturales. Ruttan (1992) va aún más lejos al afirmar que la sustentabilidad es el resultado de aquellas políticas que pueden mantener y mejorar la productividad agrícola, protegiendo al mismo tiempo los beneficios del ambiente y minimizando el daño ambiental provocado por los métodos de la agricultura moderna. Sin duda, es posible encontrar muchas definiciones más, que no son sino variantes que giran alrededor de tres ideas concurrentes: (a) la necesidad de mantener, a través de los años, la productividad biológica y económica del sector rural, (b) preservar los recursos naturales y la calidad del ambiente, y (c) garantizar condiciones de equidad dentro de la generación actual y entre las generaciones actual y futuras.

La complejidad del problema se pone de manifiesto en un informe del Departamento de Agricultura de los EEUU (USDA, 1991) que señala varios elementos o valores que deben ser incorporados para que una agricultura pueda ser considerada sustentable. Debe acreditar viabilidad biológica, factibilidad económica, aceptabilidad social, deseabilidad política, respeto al ambiente, equidad dentro y entre generaciones, disponibilidad tecnológica y aplicabilidad práctica.

Como vemos, la visión sobre el desarrollo no solo ha ido cambiando en el transcurso de las décadas, sino también se ha ido complicando al tener que conciliar elementos y valores que no siempre son convergentes. Enfrentar los dilemas que plantea el desarrollo sustentable implica, en la práctica, resolver un problema de dimensiones múltiples y alta complejidad operativa.

Para que un sistema agropecuario sea considerado sustentable, deben cumplirse tres condiciones: (a) que la tasa de uso de los recursos naturales renovables no exceda la capacidad del propio sistema para regenerarlos, (b) que la extracción de recursos naturales no renovables no exceda la tasa de desarrollo de sustitutos, y (c) que la tasa de producción o emisión de residuos no exceda la capacidad natural de asimilación del sistema en que son producidos (Daly, 1990). Esto significa que las capacidades de regeneración, sustitución y asimilación deben ser preservadas como un capital natural del sistema que, al ser agotado, lo conduce a una pérdida inevitable de sustentabilidad.

Ruttan (1993) asocia la sustentabilidad de un sistema al valor económico que se asigna a los recursos naturales que se utilizan; si el precio de un recurso está subvaluado, la teoría económica ortodoxa nos enseña que será sobre utilizado.

Wagner (1990) señala que la idea de reemplazar la agricultura moderna por modelos productivos de bajos insumos, puramente orgánicos, libre de químicos, no es, en la práctica, sustentable. La idea puede "lucir bien por algún tiempo, y más aún, engañar al público inocente...", pero no aparece como una solución definitiva para los problemas de la agricultura en el largo plazo. No hay dudas que se puede hacer un mejor uso de los procesos orgánicos: manejar mejor y más eficientemente los residuos de cosecha y los residuos animales, hacer un uso más extensivo de las leguminosas, utilizar labranzas conservacionistas, rotar cultivos, hacer un manejo integrado de plagas y malezas, minimizar el uso de pesticidas y fertilizantes, etc. Pero lo que no parece ser posible es sostener los niveles de productividad actuales de la agricultura con técnicas íntegramente orgánicas. Keeney (1986) y Odum (1989) señalan que los ciclos y flujos orgánicos de un ecosistema agropecuario no pueden ser compatibles con los ciclos y flujos de un ecosistema natural, particularmente en relación a la economía del N.

Tanto en las agriculturas intensivas de altos insumos como en las extensivas de bajos insumos, suelen plantearse situaciones severas de pérdida de sustentabilidad. Los principales problemas ambientales que acarrear las agriculturas desarrolladas del Hemisferio Norte surgen del uso excesivo de fertilizantes, pesticidas y agua. En el Hemisferio Sur, en cambio, los problemas surgen con la destrucción de tierras por erosión, la contaminación hídrica, y la deforestación (Ruttan, 1992; Viglizzo, 1994).

La idea de sustentabilidad agropecuaria aparece encuadrada en un marco teórico-conceptual que es necesario desarrollar para definir sus alcances. Pero su aplicabilidad práctica está restringida por un conjunto de limitaciones que es necesario conocer para no caer en la seducción de soluciones utópicas. Los métodos de evaluación y medición de la sustentabilidad en agricultura deberían ser dimensionados en función de los alcances y limitaciones que la idea acarrea para cada región agropecuaria en particular. La generalización de procedimientos universales es tentadora, pero presenta dificultades que es necesario prever.

La materia orgánica edáfica, en lo que respecta tanto a su contenido como a su composición, constituye uno de los indicadores más conspicuos de los factores calidad y salud del sistema suelo (Rovira, 1993). En el primer caso, a través de su condición en el



estado estacionario del sistema, y en el segundo, a través de la expresión del grado de deterioro del mismo en condiciones de uso. Ambos factores resultan claves en la definición de la sustentabilidad de los agroecosistemas.

El nivel y el tipo de materia orgánica de los horizontes superficiales definen sus características estructurales (Vazquez *et al.*, 1990), afectando de esta forma a la transmisión de agua y aire a través del mismo, a su resistencia frente a los procesos de degradación física y a su erodabilidad. En relación a los procesos químicos, constituye la fuente y el reservorio de nutrientes, actúa como regulador de la acidez y condiciona las características del ambiente en el que tienen lugar las diferentes reacciones químico-biológicas. Desde un punto de vista ambiental, la materia orgánica interviene en el ciclo del C atmosférico y es capaz de disminuir los efectos de la contaminación por el uso de plaguicidas fijando sus principios activos y, en algunos casos, actuando como un degradador de tóxicos (Larson & Pierce, 1994).

1.2 Utilidad del aporte de la tesis

Asumiendo que la materia orgánica puede ser concebida como una variable indicadora de la sustentabilidad de los agroecosistemas, a través de su componente edáfica, la modelización de su evolución bajo condiciones naturales locales, y de la alteración de sus fracciones a través del uso del suelo podría ser de gran utilidad. De esta forma, se pone de manifiesto la importancia de estimar en términos cuantitativos la evolución de la materia orgánica, bajo diferentes situaciones de uso y manejo de las tierras, en las distintas regiones productivas del país, a fin de estimar el impacto de las mismas de acuerdo a la resistencia y resiliencia de los agroecosistemas.

Los antecedentes en la modelización de la materia orgánica demuestran que los modelos actualmente en uso fueron validados bajo las condiciones del Hemisferio Norte. Según lo expresado acerca de la importancia de la materia orgánica edáfica como índice de los factores calidad y salud del suelo -condicionantes de la sustentabilidad de los sistemas productivos-, se considera que la validación de los mismos frente a las condiciones ambientales locales y a las tecnologías adoptadas en la región, constituye una trascendente contribución al conocimiento.

El área bajo estudio comprende una amplia región del centro de Argentina, donde es posible identificar amplios gradientes ambientales y socioeconómico -

culturales. Sumado a las variaciones en atributos climáticos, geológicos y geomorfológicos, que definen el patrón de distribución de suelos y vegetación, existe consecuentemente, una amplia gama de actividades agropecuarias. Esto permite identificar zonas con historia de uso y manejo contrastantes, que resultan en variaciones de importancia en las características de los agroecosistemas actuales.

Sin embargo, un estudio de estas características -en una zona tan extensa y variable- presenta sus limitaciones, permitiendo en algunos casos, sólo arribar a conclusiones generales y parciales. Asimismo, en esos casos particulares, se hace necesario la realización de estudios a una escala de mayor nivel de detalle, de manera de llegar a conclusiones puntuales.

1.3 Objetivos

1.3.1 General

Asumiendo que la materia orgánica edáfica, tanto en lo que respecta a su contenido como a su composición, constituye uno de los indicadores más conspicuos de la calidad y salud del sistema suelo, y que éste es un factor clave en la definición de la sustentabilidad de los agroecosistemas, el objetivo general de esta tesis es evaluar la dinámica de la materia orgánica edáfica como indicador de sustentabilidad bajo diferentes condiciones ambientales, de uso y manejo en la región central de Argentina, mediante la utilización de un modelo matemático de simulación.

1.3.2 Específicos

1- Estudiar el efecto de largo plazo de diferentes historias de uso y manejo de la tierra sobre la dinámica de la materia orgánica edáfica, frente a condiciones ambientales variables, a través de la utilización de un modelo matemático de simulación.

2- Analizar la evolución en el contenido del C orgánico del suelo, en base a las condiciones ambientales y antrópicas que llevaron al sistema desde su estado estacionario natural hasta el actual, como forma de expresión del grado de deterioro de la sustentabilidad de los agroecosistemas.

3- Evaluar la capacidad predictiva de algún modelo matemático de simulación de la dinámica de la materia orgánica del suelo, a partir de diferentes escenarios futuros de evolución climática y alternativas de uso y manejo de las tierras, en las condiciones edafoclimáticas de la región bajo estudio.

1.4 Hipótesis de Trabajo

1- Diferentes historias de uso y sistemas de manejo de las tierras afectan de distinta manera la cantidad de materia orgánica edáfica presente en el estado estacionario actual, de acuerdo a las características de los factores que condicionan la génesis de los suelos de las diferentes sub-regiones (textura, clima, vegetación, relieve), que determinan en parte, la resistencia y resiliencia del sistema.

2- El nivel de variación en el contenido de materia orgánica y la sensibilidad de este indicador dependen del grado de deterioro del sistema alcanzado al momento de aplicar determinado manejo, respecto a su estado estacionario natural.

3- El modelo Century es una herramienta adecuada para simular la evolución del contenido de materia orgánica en la porción superficial del suelo desde el estado estacionario natural hasta la situación actual en tierras bajo diferentes historias de uso y manejo para las diferentes condiciones edafoclimáticas presentes en el área bajo estudio.

4- El uso del modelo Century permite estudiar la interacción entre los factores ambientales y antrópicos que llevaron al sistema a su estado estacionario actual y establecer rangos de valores de referencia, necesarios para su utilización como forma de expresión del grado de deterioro de los agroecosistemas.

5- Las variaciones en el contenido y calidad de la materia orgánica edáfica frente a diferentes alternativas futuras de uso y manejo de las tierras, pueden ser predichas de manera aceptable por el modelo Century, para cada una de las sub-regiones bajo estudio.

6- El uso del modelo Century permite predecir las variaciones en el contenido y calidad de la materia orgánica edáfica frente a diferentes escenarios de cambio climático global, para cada una de las sub-regiones bajo estudio.

7- A partir de las simulaciones realizadas con el modelo Century, es posible estimar la capacidad de secuestro de CO₂ atmosférico en los suelos de la región bajo estudio, para diferentes escenarios futuros de uso y manejo de las tierras.

Capítulo 2: La materia orgánica como indicador de la sustentabilidad

2.1 Evaluación de la sustentabilidad

La idea de sustentabilidad tiende un puente entre la ciencia del ambiente y la ciencia agropecuaria. La investigación se enfrenta con un conflicto mayor: la diferencia de enfoques, métodos y técnicas que existe entre la investigación ambiental y agropecuaria.

La investigación agropecuaria tiende, en general, a responder a una visión general de la ciencia. Predominan los enfoques cartesianos y reduccionistas en los que se pone un claro énfasis sobre las relaciones causa-efecto. Se encuadra dentro de una concepción utilitarista y antropocéntrica del mundo. Por otro lado, la investigación del ambiente responde a una visión holística, multidisciplinaria y sistémica de la ciencia, en la cual se buscan explicar procesos y mecanismos más que relaciones de causalidad (Bertalanffy, 1963). En esta visión se desplaza al hombre y sus intereses económicos del centro de la escena.

De estas dos agendas científicas en conflicto, surge una tercera (Ruttan, 1992) que puede orientar investigaciones futuras en el campo de la sustentabilidad agropecuaria: (a) interdisciplinaria, orientada hacia sistemas, (b) acepta regulación de precios y bienes ambientales, (c) impulsa la creación de técnicas de alta precisión, intensivas en el uso de información y conocimientos, y (d) diferencia la valorización de objetivos de acuerdo a las peculiaridades de cada región.

La idea de sustentabilidad plantea una flexibilidad de criterios que nace de considerar las peculiaridades y problemáticas de cada región.

La calificación de un agroecosistema como “saludable” o “no saludable”, o como sustentable o no sustentable, requiere establecer criterios y elementos de juicio específicos (Campbell *et al.*, 1992) para los cuales se han descrito algunos procedimientos de diagnóstico (Schaeffer *et al.*, 1988). No obstante, no existe un criterio ni un procedimiento único para calificar la sustentabilidad en un agroecosistema.

La calidad del suelo es un componente clave de la sustentabilidad (Warkentin, 1995; Doran *et al.*, 1996), por lo que su evolución en el tiempo resulta un indicador

primario del manejo sustentable de los agrosistemas (Doran *et al.*, 1996; Seybold *et al.*, 1999).

Evaluar la sustentabilidad no es sencillo. Graham-Tomasi (1991) señaló la necesidad de considerar dos tipos de evaluaciones, una sobre la pérdida de capital natural, y otra sobre la contaminación del ambiente y daños causados por ella.

Las evaluaciones sobre la pérdida de capital natural implican considerar ciertos costos. Como algunos recursos naturales esenciales suelen ser explotados en forma creciente por encima de los niveles de sustentabilidad, los costos que acarrearía compensar esa pérdida también ascienden. Tales costos deberían reflejar la singularidad del recurso explotado y el valor que implicaría sustituirlo. Estas estimaciones deberían imputarse como un costo en las cuentas de una nación, región o provincia para generar, a partir de ellas, proyectos compensatorios que preserven la sustentabilidad de los ecosistemas (Tisdell, 1993).

Por otro lado, aparecen las evaluaciones sobre los costos de la contaminación ambiental. Están basadas en medir la predisposición de los individuos para sustituir sus ingresos por bienes ambientales, o sea, su predisposición a pagar, o dejar de percibir, para sostener un ambiente "sano". Este tipo de evaluaciones está todavía limitado por la carencia de métodos rigurosos y técnicas apropiadas que permitan conducir investigaciones empíricas de alto valor práctico.

Los problemas de sustentabilidad se dan a distintos niveles jerárquicos en la organización de los sistemas agropecuarios y pueden ser valorados mediante indicadores específicos. Aparecen vínculos entre distintos niveles jerárquicos, pero nada permite asegurar que los problemas que se presentan en un nivel más alto sean iguales a la suma de los problemas que ocurren en niveles más bajos. En los niveles más altos hay un dominio de los procesos socio-económicos y culturales, en tanto en los inferiores predominan los físicos y biológicos. Ello implica seleccionar indicadores diferentes al pasar de un nivel al siguiente.

2.2 Instrumentos de evaluación: medidas e indicadores

Una "medida" es un instrumento de evaluación preciso, bien definido, a menudo complejo, o de alta elaboración tecnológica. En cambio, un "indicador" es un instrumento de evaluación muy correlacionado con la medida, pero fácil de observar o

registrar, y debe ser sencillo de entender. La simple observación y registro directo de un fenómeno de erosión del suelo en una parcela o potrero, aunque sea o no cuantificable, es un indicador de sustentabilidad.

Tanto en medidas como en indicadores, puede ser necesario identificar atributos y clases (Campbell *et al.*, 1992). Dentro de la matriz que se genera al cruzar atributos con clases, es posible identificar las medidas e indicadores que mejor se adaptan a la evaluación planeada. Las clases, por su parte, expresarán la condición actual o estado por un lado, y la tendencia por el otro, de cada uno de los atributos evaluados.

Los atributos agronómicos son aquellos asociados al proceso productivo como resultado de una decisión humana, por ejemplo, áreas sembradas o implantadas con distintas especies vegetales. Los atributos ecológicos, desde un punto de vista agropecuario, están referidos a la calidad del ambiente productivo, y suelen ser el resultado, voluntario o no, de un conjunto de actividades humanas como por ejemplo áreas erosionadas, enmalezadas, inundadas, anegadas, etc. Los atributos económicos son aquellos referidos a la performance económica o financiera del sistema o nivel que se está evaluando, por ejemplo, la productividad económica de una empresa agropecuaria o del sector rural de una región o provincia. Por su parte, los atributos socio-culturales están referidos a componentes de equidad dentro de una misma generación o entre generaciones, y cuál es la actitud de la población estudiada frente a ellos (Viglizzo, 1996).

La condición actual revela el “estado de salud o enfermedad” del sistema. Altieri *et al.* (1983) identificaron enfermedades del ecotopo (erosión, pérdida de fertilidad, salinización, alcalinización en suelos) y enfermedades de la biocenosis (pérdida de cosechas, pérdida de plantas y animales silvestres, eliminación de enemigos naturales, resistencia a pesticidas, etc.). La tendencia de un atributo a través de los años puede ser estable, creciente o decreciente, y exige una valoración de varios años para describir y cuantificar el sentido del desplazamiento. Las mayores dificultades para definir una tendencia temporal son la carencia de datos históricos, o la baja confiabilidad de los mismos.

También es necesario diferenciar medidas o indicadores de causa y de efecto. Los indicadores de efecto reflejan una situación (por ejemplo, la pérdida de productividad de un suelo), pero la explicación de esa situación sólo puede encontrarse en un indicador de causa (por ejemplo, la pérdida creciente de N en un suelo). De este

modo, un indicador de efecto permite identificar un problema y un indicador de causa permite explicarlo para buscar una solución.

Todas las medidas de sustentabilidad generan índices cuantificables precisos, de alta elaboración técnica, e intensivos en el uso de información. Sus principales fuentes de información suelen ser los censos, el procesamiento de datos secundarios, los análisis de costos para el ambiente, y el manejo de información de sensores remotos. Inevitablemente, su costo también suele ser alto. Dada su complejidad, es necesario complementar estos instrumentos con otros métodos que, aunque menos precisos, permitan valoraciones rápidas, poco costosas y sencillas. Así surgen los indicadores de sustentabilidad. Estos, más subjetivos en su elaboración, pueden surgir de observaciones y mediciones directas, de datos secundarios, de valoraciones participativas, de datos de sensores remotos, etc. Por ejemplo, erosión de suelos, salinización, enmalezamiento, etc.

2.3 Métodos de evaluación

Es conveniente definir a priori qué nivel de sistema necesitamos evaluar, ya que la extrapolación de uno a otro nivel puede ser riesgosa y dar lugar a interpretaciones sesgadas.

La evaluación de la sustentabilidad en agricultura exige reunir ciertas características deseables en materia de medidas e indicadores. Algunos autores como Hunsaker y Carpenter (1990), Sutter (1990) y Winograd (1993) señalan, entre otros, los siguientes aspectos: (a) las mediciones deben ser técnicamente factibles y fáciles de realizar, (b) deben concentrarse sobre aquellas variables relevantes ante las cuales el sistema estudiado muestra una particular sensibilidad, (c) deben ser representativas en términos de cobertura geográfica, (d) deben facilitar su incorporación a series temporales que permitan examinar cambios ocurridos en la calidad de los recursos naturales a través del tiempo, (e) deben permitir diferenciar claramente las causas de los efectos, y (f) deben ser poco costosas y, hasta donde sea posible, eficaces en el aprovechamiento de información disponible.

El levantamiento de información debería ir precedido de un diseño estadístico apropiado. El muestreo debería realizarse en aquellas épocas del año en que la varianza de la variable crítica a evaluar resulte mínima, y su media representativa de la condición

predominante. Generalmente, la frecuencia muestral tiende a aumentar en los sistemas ubicados sobre los niveles jerárquicos más bajos, o sea aquellos que presentan una variabilidad mayor en períodos más cortos de tiempo. Por su parte, las exigencias de repetitibilidad espacial tienden, por contrapartida, a ser menores en este nivel de sistemas. Viglizzo (1996) sugiere que, para ser estadísticamente válido, el diseño muestral debería reunir las siguientes propiedades: (a) el marco muestral debe cubrir el universo completo de interés, (b) debe definirse un procedimiento para dividir el marco muestral en unidades de muestreo, de manera que ninguna parte del marco sea incluida más de una vez, u omitida, (c) debe determinarse el número de unidades de muestreo requeridas para alcanzar un nivel deseado de precisión a un costo mínimo, (d) cada unidad muestral debe ser seleccionada con una probabilidad conocida, (e) se debe definir un procedimiento para expandir la muestra a mediciones dentro del dominio de interés, y (f) el diseño debe permitir valorar la precisión de los resultados muestrales.

En determinadas circunstancias ocurre que las simples mediciones biofísicas, sea a través de medidas o indicadores, no alcanzan para caracterizar la condición y tendencia del sistema estudiado. Muchas veces es necesario comprender estructuras y funciones más complejas que no pueden ser interpretadas mediante mediciones simples o aisladas (Campbell *et al.*, 1992). En esos casos suelen requerirse mediciones complejas surgidas de una agregación de medidas e indicadores en modelos que ayudan a interpretar situaciones específicas de una agricultura en particular. Es posible así identificar señales de acción en un sistema al poner en contacto componentes ligados por relaciones de causalidad como ocurre, por ejemplo, entre producción y erosión, o entre producción y contaminación.

Un modelo que parece ser particularmente útil para valorar procesos a través de una agregación de medidas e indicadores, es el denominado modelo PER (Presión-Estado-Respuesta). En la aplicación del PER es posible identificar medidas e indicadores de presión sobre el ambiente (por ejemplo, tasas de expansión de cultivos de cosecha en áreas marginales), de estado (por ejemplo, condición actual y tendencia en la fertilidad y estructura de los suelos), y de respuesta (por ejemplo, las acciones y la propia voluntad de la sociedad para mejorar el estado del ambiente productivo). Viglizzo (1996) sugiere incorporar un cuarto grupo de medidas e indicadores que denomina de performance, y que apuntan a predecir la insustentabilidad de determinados procesos o el avance hacia determinados objetivos de sustentabilidad (por

ejemplo, las consecuencias que pueden llegar a tener un cambio programado en el modelo actual de uso de la tierra sobre la calidad del ambiente productivo). El modelo puede actuar de manera iterativa permitiendo evaluar globalmente la sustentabilidad de un proceso complejo y continuo.

2.4 Antecedentes sobre el desarrollo de modelos de materia orgánica

La materia orgánica edáfica es un factor central para el ciclo de los nutrientes, influye en gran medida sobre las relaciones hídricas y sobre la erodabilidad potencial, y constituye un factor clave en relación a la estabilidad estructural de los suelos (Tisdale & Oades, 1982). Su importancia no sólo reside en sus efectos favorables sobre la productividad y calidad de los suelos (Stevenson, 1986) sino en su potencial contribución en el secuestro de C a partir del actualmente en incremento CO₂ atmosférico (Thornley *et al.*, 1991).

La literatura ofrece abundante cantidad de información sobre las características y propiedades de la materia orgánica edáfica y sobre la dinámica del C, N, S y P a través de ella. Una forma interesante de integrar estos conocimientos, e imponerles un componente dinámico a su funcionalidad, es mediante la incorporación de los conceptos de formación y transformación de la materia orgánica en un modelo de simulación que permita simular variaciones de mediano y largo plazo en las diferentes fracciones que la componen (Stevenson, 1986; Parton *et al.*, 1987).

Diferentes modelos de este tipo han sido desarrollados y ampliamente utilizados durante los últimos 30 años con el objeto de mejorar el conocimiento sobre la dinámica de la materia orgánica edáfica en su estado de equilibrio y sobre los cambios que los distintos esquemas de uso del suelo provocan sobre ella, bajo diferentes condiciones ambientales. La utilización de estos modelos puede tener múltiples objetivos: desde la simulación del efecto de los gradientes climáticos sobre el nivel de materia orgánica, o la identificación de los factores que controlan este nivel dentro de una misma zona climática (Parton *et al.*, 1987) - aspectos relativos al estado estacionario del sistema suelo - hasta la simulación de los cambios provocados por el uso agrícola-ganadero y

del efecto de las prácticas de manejo sobre la dinámica de las fracciones orgánicas (Parton & Rasmussen, 1994).

El modelo desarrollado por Jenkinson y Rayner (1977) sugiere que la materia orgánica edáfica puede dividirse en las fracciones activa, estable y pasiva, con tasas de transformación que involucran períodos de descomposición de 1, 30 y 1500 años, respectivamente. Campbell (1978) casi simultáneamente desarrolló un modelo que considera sólo dos fracciones: la activa y la estable, con tasas de transformación de 53 y 1429 años, respectivamente. van Veen y Paul (1981) utilizaron un enfoque similar, pero introdujeron los efectos de la presencia de fracciones orgánicas protegidas física o químicamente de la erosión y de los tipos de labranzas en su modelo. Además, estos autores dividieron a los residuos vegetales en descomponibles y recalcitrantes. Más tarde, Parton *et al.* (1987), incluyeron el efecto de la textura sobre la dinámica de la materia orgánica y desarrollaron un modelo generalizado para el ciclo de los nutrientes que simula la dinámica del C, N, P y S (Parton *et al.*, 1988). Una versión más reciente del modelo de Jenkinson (Jenkinson, 1990) incluye el concepto de protección física que la arcilla ejerce sobre la materia orgánica.

El modelo de Jenkinson y Rayner fue validado utilizando datos de los ensayos de largo plazo de la estación experimental de Rothamsted (Jenkinson, 1990); el de van Veen y Paul fue probado en Canadá, con datos locales de materia orgánica para diferentes condiciones ambientales (van Veen & Paul, 1981; Voroney *et al.*, 1981). El modelo Century fue validado inicialmente con datos de C y N orgánicos y con valores de producción de biomasa de los pastizales de las "Great Plains" americanas (Parton *et al.*, 1987) y fue probado luego para esquemas de producción agrícola, utilizando datos de experimentos de largo plazo en Suecia (Paustian *et al.*, 1992) donde se involucró a la fertilización nitrogenada y en Pendelton, USA (Rasmussen & Parton, 1993; Parton & Rasmussen, 1994), donde se emplearon datos provenientes de ensayos de manejo de residuos de cosecha para un monocultivo de trigo durante 54 años.

El modelo Century fue desarrollado para simular los efectos de gradientes macroambientales, como una primera aproximación hacia la simulación de los efectos del cambio climático, y su diseño involucra tanto a las propiedades del suelo y de la vegetación como a las variables de manejo del sistema durante largos períodos de tiempo (50 - 2000 años). El modelo es capaz de simular la productividad primaria, así como la dinámica del agua y los nutrientes dentro del suelo, pero pone su énfasis en la

dinámica de la materia orgánica edáfica, ya que ésta permite integrar los conceptos dinámicos de variaciones anuales en la producción y descomposición de los tejidos vegetales. La simulación de este modelo involucra tanto a las fracciones estables (de lenta transformación) como a las lábiles (de rápida transformación) con lo cual, además de estimar la cantidad total de materia orgánica presente en el suelo, ofrece una medida de su capacidad para el abastecimiento de nutrientes a las plantas (Parton *et al.*, 1987). Los pastizales naturales pampeanos han sido destruidos por el pastoreo y el fuego durante el siglo XIX a lo que se sumó el uso agrícola posterior (Soriano, 1991). En los suelos de las diversas áreas de la región pampeana Argentina se han reportado pérdidas de materia orgánica a nivel de lote, a partir de estudios comparativos entre situaciones de manejo agrícola y/o pastoril con situaciones de escasa alteración antrópica como parques de cascos de estancias (Michelena *et al.*, 1988; Vazquez *et al.*, 1990). La magnitud de tales pérdidas en el caso de lotes en la Pampa Ondulada alcanzó valores de 35% de la concentración de C en superficie bajo situaciones agrícolas (Alvarez *et al.*, 1995).

Capítulo 3: El Modelo Century Agroecosystems

3.1 Introducción

El modelo Century Agroecosystem Versión 5.0 (Parton, 1996) fue especialmente diseñado para el análisis a nivel de agroecosistemas de la evolución de su productividad y sustentabilidad, siendo posible su aplicación a un amplio rango de condiciones ecológicas y sistemas productivos, desde esquemas ganaderos extensivos sobre pastizales naturales hasta complejos sistemas de cultivos, rotaciones y prácticas de manejo. Esta versión integra el efecto de las variables directrices edáficas y climáticas, junto a las variables de manejo, para simular la dinámica del C y del agua en el sistema suelo-planta.

El modelo fue desarrollado y calibrado para representar a nivel del sistema suelo-planta la dinámica a largo plazo del C y los nutrientes mayores (N, P, S) a través de los residuos vegetales y la materia orgánica edáfica en diferentes tipos de ecosistemas (pastizales, bosques, sabanas y cultivos). El desarrollo inicial del modelo, su estructura, su base científica y la forma en que los diferentes parámetros fueron estimados son descritos en Parton *et al.* (1987), Parton *et al.* (1988), y Sanford *et al.* (1991), mientras que los aspectos relativos a versiones posteriores fueron discutidos por Metherell (1992).

Century Agroecosystems es un modelo de tipo mecanístico o explicativo en base a sus fundamentos biofísicos, determinístico por la naturaleza de sus entradas y salidas, y dinámico, ya que calcula e integra los resultados dentro de un horizonte temporal. El presente capítulo intenta describir los lineamientos generales sobre la estructura interna del modelo, los requerimientos de información y la base conceptual sobre la cual se asientan los cálculos y simulaciones que el mismo genera. Aspectos más detallados, en relación al diseño de las simulaciones y al tipo de resultados así como a su interpretación, serán tratados en el Capítulo 5 sobre Aspectos Metodológicos, sólo para aquellas variables relevantes en el marco del presente trabajo.

3.2 Estructura interna y requerimientos de información

El modelo Century está integrado por diferentes sub-modelos interrelacionados: el *sub-modelo de materia orgánica* reviste un carácter central e integrador respecto de los *sub-modelos de N, P y S*, que incluyen a los compartimentos orgánicos e inorgánicos, y de los *sub-modelos de producción de biomasa* (sub-modelos pastizales, cultivos, bosques y sabanas), estrechamente ligados al primero. La emisión de CO₂ a la atmósfera por la actividad microbiológica edáfica, al igual que la captación de este gas para el proceso fotosintético pueden ser así mismo simuladas. El modelo trabaja con un paso temporal mensual y requiere relativamente pocos datos, sencillos y normalmente disponibles o posibles de ser estimados a partir de la literatura existente. Los de mayor importancia son los siguientes:

- (1) Temperaturas máximas y mínimas medias mensuales del aire,
- (2) precipitación mensual y su coeficiente de variación,
- (3) contenido de lignina promedio de la vegetación o cultivo,
- (4) contenido promedio de N, P, y S en la vegetación o cultivo,
- (5) granulometría de los materiales originarios del suelo y textura,
- (6) aportes atmosféricos y disponibilidad edáfica de N, y
- (7) niveles iniciales de C, N, P, y S en el suelo.

Muchos de estos datos son utilizados en otro tipo de simulaciones, como por ejemplo la concentración de nutrientes en planta, que normalmente se emplea para la simulación de sistemas agrícolas. Del mismo modo, hay una serie de datos menores como profundidad del solum y de los diferentes horizontes, condiciones de drenaje, densidad aparente, etc., que deben ser incluidos durante las simulaciones para los diferentes agroecosistemas. No obstante, dada la interdependencia interna entre los diferentes sub-modelos, y la dependencia de éstos respecto del *sub-modelo de materia orgánica*, el grado de ajuste de este último define la bondad de las estimaciones de los restantes.

El sub-modelo de materia orgánica, y en segunda instancia, el sub-modelo de producción de biomasa son los de mayor importancia a la hora de plantear una validación frente a los gradientes de condiciones biofísicas y de manejo locales, y son

los que serán estudiados en mayor profundidad durante el desarrollo de esta tesis. Derivaciones posteriores de los resultados de los restantes sub-modelos serán ilustradas en aquellos casos en que se verifique un ajuste conveniente entre los valores de C edáfico simulados y los medidos en los muestreos a campo.

3.3 Marco conceptual

La descripción de los sub-modelos de *materia orgánica y producción de biomasa*, y de los utilizados para la caracterización climática del suelo, permite visualizar claramente el modelo conceptual que respalda a las simulaciones producidas por el Century. La concepción de los sub-modelos de *N*, *P* y *S* es ilustrada mediante una breve descripción del primero de ellos.

3.3.1 El sub-modelo de materia orgánica

Este sub-modelo, al igual que otros modelos de la dinámica orgánica (Jenkinson & Rayner, 1977; van Veen & Paul, 1981; Jenkinson, 1990), se basa en el fraccionamiento conceptual de la materia orgánica edáfica en múltiples compartimentos (*pools*). La Figura 3.1 ilustra la distribución de compartimentos y los flujos de C que entre ellos ocurren, de acuerdo al marco conceptual del Century. El modelo diferencia tres compartimentos o fracciones orgánicas de acuerdo a su tasa de descomposición (activa, estable y pasiva), dos fracciones de restos vegetales (superficial y subsuperficial) y una fracción microbiana superficial asociada a los restos vegetales superficiales en descomposición.

El C proveniente de los aportes de residuos vegetales y excretas animales al suelo son particionados en una fracción estructural (STRUCC(*)) y una metabólica (METABC(*)). Esta división se produce en función de la relación entre los contenidos de lignina y N (Rel. L/N) en la biomasa de los residuos (Figura 3.1). La descomposición de la materia orgánica edáfica, así como de los residuos vegetales se asume mediada microbiológicamente con pérdidas asociadas de CO₂ (RESP(*)) como resultado de la respiración microbiana. Tales pérdidas de CO₂ a partir de la fracción activa son mayores al aumentar el contenido de arena del suelo.

Los productos de la descomposición pueden fluir hacia un compartimento microbiano superficial (SOM1C(1)) o hacia uno de los tres compartimentos que representan las fracciones orgánicas edáficas, cada uno caracterizado por diferentes tasas máximas de descomposición. Las tasas de descomposición potenciales son afectadas por un factor de corrección (M) derivado de funciones multiplicativas que involucran humedad y temperatura del suelo (media mensual cerca de la superficie) y que puede ser positivamente afectado por efecto del laboreo. La función humedad del suelo utiliza la relación entre el agua almacenada hasta los 0,3 m de profundidad sumado a la precipitación mensual y la evapotranspiración potencial.

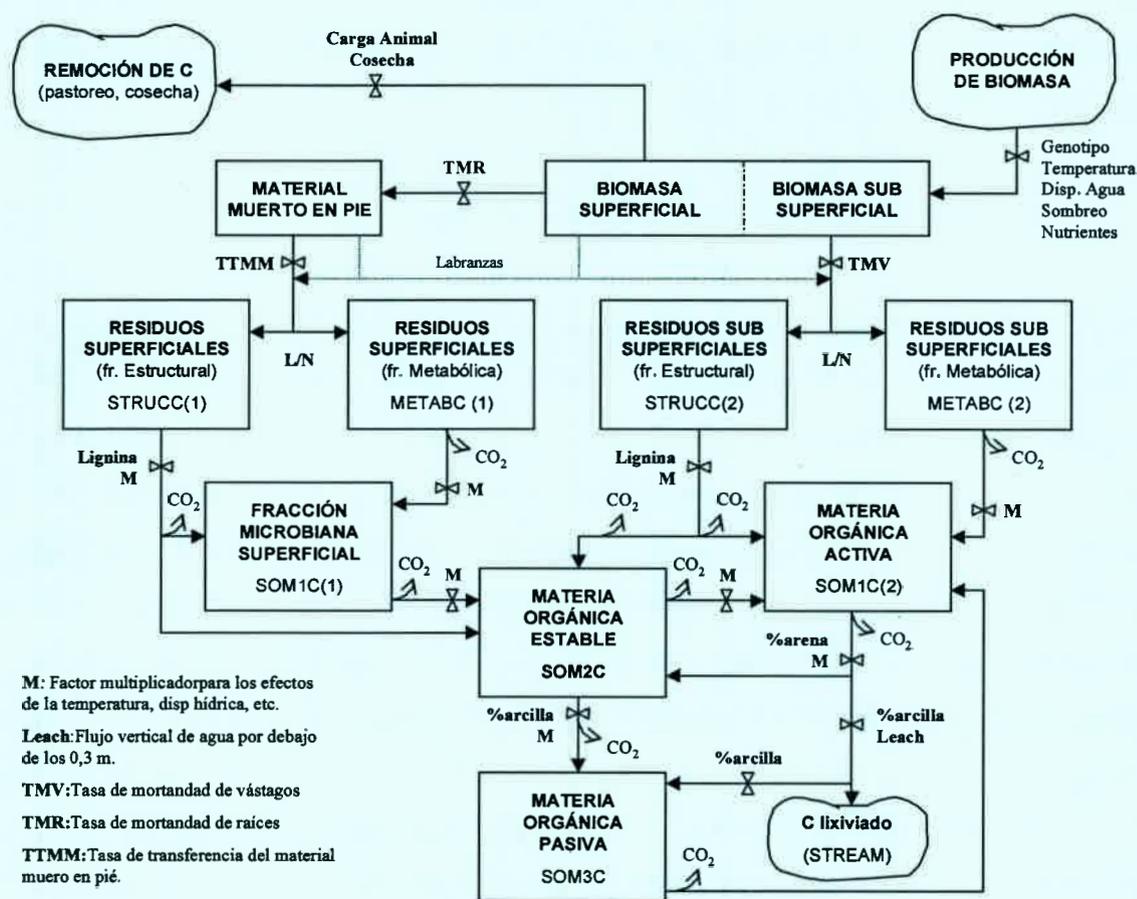


Figura 3.1: Esquema ilustrando el marco conceptual del sub-modelo de materia orgánica dentro del modelo Century Agroecosystems. Las flechas representan flujos de C. Las líneas punteadas representan los flujos provocados por las labranzas en los sistemas agrícolas. Las siglas STRUCC(*), METAMC(*), SOM1C(*), SOM2C y SOM3C corresponden a la codificación de las fracciones asignada por el modelo.

La tasa de descomposición del material estructural (STRUCC(*)) es una función de la fracción de lignina en el mismo. A medida que los residuos vegetales se descomponen, la fracción lignina de los mismos no fluye a través del compartimento superficial microbiano (SOM1C(1)) ni de la fracción orgánica activa (SOM1C(2)), sino que se asume un flujo directo hacia la fracción orgánica estable (SOM2C).

La fracción orgánica activa (SOM1C(2)) representa a la masa microbiana edáfica y a sus productos primarios y secundarios (la fracción activa total es dos a tres veces mayor que biomasa microbiana) y presenta un período de transformación (*turnover time*, la función inversa de la tasa de transformación) en el rango de meses a unos pocos años, dependiendo de las condiciones ambientales y del contenido de arena del suelo.

Textura: La textura del suelo afecta no sólo a la tasa de transformación de la fracción orgánica activa (mayores tasas en suelos arenosos) sino también a la eficiencia de su estabilización en materia orgánica estable (mayor tasa de estabilización en suelos arcillosos). La tasa de transformación de la fracción microbiana superficial (SOM1C(1)) es independiente de la textura, y regula la transferencia directa de C hacia la fracción estable (SOM2C). Esta última presenta períodos de transformación de entre 20 a 50 años e incluye al material vegetal resistente a la descomposición derivado de la fracción de residuos estructurales (STRUCC(*)) y a los productos bio-estabilizados derivados de las fracciones activa y microbiana superficial (SOM1C(*)). La fracción orgánica pasiva (SOM3C) presenta una elevada resistencia a la descomposición, con períodos de transformación de entre 400 a 2000 años, e incluye materia orgánica química y físicamente estabilizada. La proporción de productos de la descomposición de las fracciones activa y estable que fluyen hacia la fracción pasiva es mayor a medida que aumenta el contenido de arcilla del suelo.

Drenaje: Una parte de los productos de la descomposición de la fracción activa se pierde por lixiviación (STREAM(5)). La lixiviación de materia orgánica es una función de la tasa de descomposición de la fracción activa y del contenido de arcilla del suelo (menores pérdidas en suelos arcillosos), y sólo ocurre cuando existe un drenaje considerable de agua por debajo de los 0,3 m de profundidad (nivel crítico prefijado).

Las tasas de descomposición se ven reducidas en condiciones anaeróbicas (por ejemplo, elevado contenido hídrico), de manera que el drenaje reviste nuevamente un papel importante. El factor drenaje (DRAIN) es un coeficiente que varía entre 0 y 1 (DRAIN=0 para suelos arcillosos pobremente drenados y DRAIN=1 para suelos

arenosos bien drenados) y que permite asignar a cada suelo un cierto régimen de drenaje (por ejemplo, clase natural).

La fracción inorgánica: En forma análoga a los diferentes compartimentos que el modelo diferencia para la distribución del C edáfico, existen aquellos para N, P y S. Cada fracción orgánica presenta un rango admisible de valores para la relación entre el contenido de C y de los restantes elementos (Rel. C/N, C/P y C/S) basados en el modelo conceptual de Mc Gill y Cole (1981). Las relaciones C/N son plausibles de variar dentro de rangos estrechos, reflejando el concepto de que el N es estabilizado en asociación directa con el C. Las uniones éster en las que participan el P y el S, en cambio, permiten que los rangos de valores de las relaciones C/P y C/S varíen ampliamente. Estas relaciones adquieren valores elevados (fijos) en las fracciones estructurales (STRUCC(*)), mientras que en las fracciones metabólicas (METABC(*)) varían de acuerdo al contenido de nutrientes de los residuos vegetales.

Los valores de las relaciones C/N, C/P y C/S para los materiales que ingresan a cada compartimento del modelo (por ejemplo a cada fracción orgánica edáfica) son funciones lineales de la cantidad de cada elemento en la fracción inorgánica lábil del horizonte superficial del suelo (datos facultativos). Bajos niveles de nutrientes en la fracción orgánica lábil resultan en elevadas relaciones C/nutriente para los diferentes compartimentos. El flujo de N, P y S entre los diferentes compartimentos está en relación con el correspondiente al C, de manera que la cantidad de un determinado elemento que es transferida resulta del producto entre flujo de C y la relación entre el contenido del elemento considerado y el de C en el compartimento de origen.

Los procesos de mineralización e inmovilización de N, P y S ocurren en la medida necesaria para mantener en equilibrio las relaciones discutidas anteriormente. De esta forma, la mineralización se encuentra vinculada a las pérdidas de C bajo la forma de CO₂ y a los flujos de C desde fracciones con bajos valores de la relación C/nutriente también llamada activa, hacia aquellas con altos valores o estable. La inmovilización, consecuentemente, ocurre cuando el C fluye desde fracciones con altos (residuos vegetales estructurales) hacia aquellas con bajos (materia orgánica activa) valores para la relación C/nutriente. Asimismo, las tasas de descomposición se ven reducidas si la cantidad de cualquiera de los elementos considerados es insuficiente para afrontar la demanda de inmovilización.

3.3.1.1 Balances hídricos, lixiviación y régimen térmico del suelo

El modelo Century Agroecosystems incluye un modelo simplificado para el balance hídrico que calcula, para un paso mensual, las pérdidas de agua por evaporación y transpiración, el contenido hídrico de los diferentes horizontes del suelo, el aporte y almacenamiento hídrico en la nieve, y el flujo saturado de agua entre los diferentes horizontes (Figura 3.2). Si la temperatura media del aire es menor a 0 °C, las precipitaciones ocurren en forma de nieve, mientras que la sublimación y evaporación desde la superficie nevada ocurren a una tasa similar a la evapotranspiración potencial (ETP). El deshielo se produce cuando la temperatura del aire es superior a 0 °C y su ritmo aumenta linealmente con la misma.

El agua aportada sobre la superficie del sitio es particionada en escurrimiento, transpiración, evaporación directa, flujos subsuperficiales (percolación, flujos hipodérmicos horizontales) y almacenaje de agua en el suelo. La tasa de evapotranspiración potencial es calculada como función de las temperaturas máximas y mínimas medias mensuales mediante una ecuación desarrollada por Linacre (1977). El cálculo del agua de escurrimiento es presentado en el Anexo I (Tablas 1 y 2).

Las pérdidas de agua por evaporación directa desde la superficie del suelo dependen de la cantidad de material vegetal muerto en pie, de la biomasa de residuos cubriendo el suelo, de las precipitaciones (PP) y de la ETP. Las pérdidas de agua por intercepción aumentan en función del nivel de biomasa aérea (que determina al mismo tiempo la magnitud de las pérdidas por transpiración) y dependen asimismo de las PP y la ETP. Tanto las pérdidas por evaporación como por intercepción son calculadas como fracciones de la PP mensual y sustraídas de ésta, mientras que la restante es el agua que es efectivamente adicionada al suelo.

El agua es distribuida entre los diferentes horizontes a partir de la adición de agua al horizonte superficial (0 - 0,15 m) y el posterior drenaje del exceso hacia el horizonte inmediato inferior. Las pérdidas de agua por transpiración ocurren luego de que el agua fue adicionada al suelo. La suma de las pérdidas por intercepción, evaporación directa y transpiración no supera a la ETP, que representa la tasa máxima mensual de pérdida de agua.

Los valores de las constantes hídricas de cada horizonte (capacidad de campo y capacidad a la marchitez permanente) pueden ser suministrados al modelo, aunque éste

es capaz de calcularlos por defecto, en función de la densidad aparente, la textura y el contenido de materia orgánica. Para tales cálculos es posible seleccionar, mediante la asignación de un valor al parámetro SWFLAG, entre la ecuación desarrollada por Grupta y Larson (1979) y la desarrollada por Rawls *et al.* (1982), cuyo grado de ajuste varía con las condiciones ambientales.

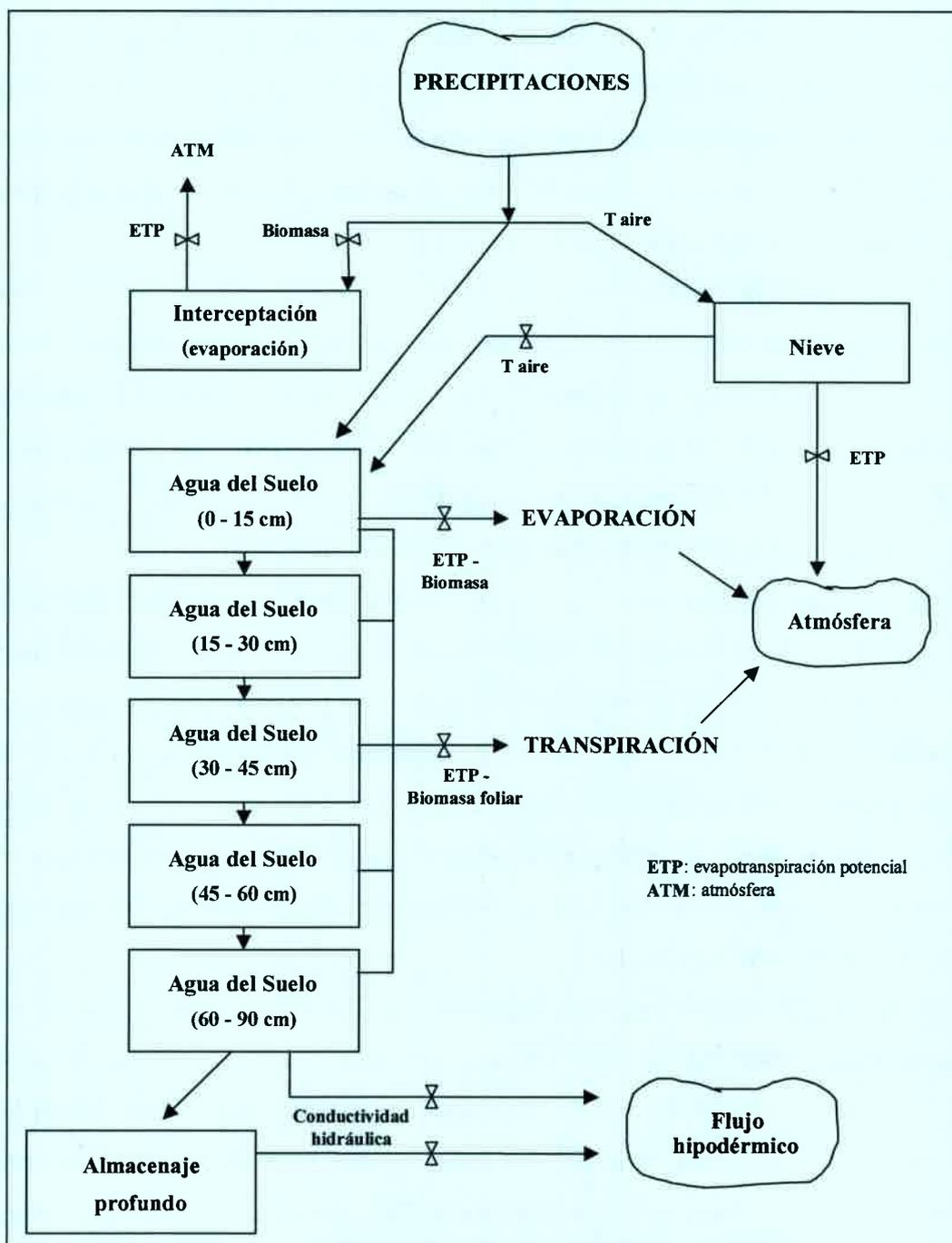


Figura 3.2: Esquema indicando la conceptualización del modelo simplificado utilizado en el Century para el cálculo de los balances hídricos.

El número de horizontes es una de las variables dadas, aunque la profundidad de cada horizonte es fija (0,15 m hasta los 0,6 m de profundidad y 0,3 m a profundidades mayores) para el cálculo del balance hídrico. El agua que percola más allá del último horizonte no es considerada disponible para la evapotranspiración, e indica una medida de las pérdidas por lixiviación. Ajustando los parámetros STORMF y BASEF, el modelo es capaz de simular los flujos hipodérmicos dentro de una cuenca. Estos ajustes resultan relevantes cuando se trabaja con los sub-modelos N, P y S, ya que sus formas minerales lábiles (por ejemplo NO_3^- y NH_4^+ para N) son susceptibles a la lixiviación, aumentando con el régimen de precipitaciones y con el contenido de arena del suelo.

La temperatura media mensual del suelo cerca de la superficie es calculada mediante ecuaciones desarrolladas por Parton (1984). Las mismas estiman las temperaturas máximas y mínimas del suelo en función de las del aire y de la biomasa vegetal que lo cubre. La temperatura del suelo utilizada para el cálculo de las tasas de descomposición y de crecimiento vegetal resulta del promedio de las temperaturas máximas y mínimas del suelo.

3.3.2 Los sub-modelos de producción de biomasa

El estudio de la dinámica del C en los diferentes agroecosistemas requiere de la simulación del componente biomasa vegetal, ya sea en sistemas agrícolas, en pastizales naturales como en sistemas de bosques y sabanas. El sub-modelo de pastizales y cultivos simula la producción de biomasa de diferentes cultivos herbáceos y de comunidades vegetales (por ejemplo pastizales invernales o estivales, etc.). Diferentes eventos tales como pastoreo, incendios, labranzas, fertilización, riego, cosecha, etc., pueden ser incluidos en las simulaciones, ya que los mismos afectan en forma directa a la producción de biomasa aérea y, en los casos de pastoreo y fuego, a las relaciones raíz/vástago y al contenido de nutrientes.

El sub-modelo forestal simula el crecimiento de bosques caducifolios o perennifolios en sus estadios juveniles y maduros. El fuego, los disturbios de gran escala (huracanes) y las prácticas de tala y manejo forestal son las variables de mayor impacto sobre la producción de biomasa. Los ecosistemas de tipo sabana son simulados mediante la combinación de los sistemas pastizal y bosque, mediante los sub-modelos

mencionados, y considerando las interacciones competitivas por efecto del sombreado y la competencia por N.

Ambos sub-modelos de producción de biomasa asumen que la máxima producción mensual es controlada por la disponibilidad hídrica y por la temperatura, y que las tasas de producción máxima pueden ser limitadas por la disponibilidad de nutrientes (macronutrientes). La disponibilidad de nutrientes inorgánicos para el crecimiento vegetal se encuentra en función de la biomasa radicular (por ej. volumen de suelo explorado), incrementando exponencialmente dentro del rango de 20 a 300 g m⁻² de biomasa de raíces. Se asume que la mayoría de los sistemas de pastizales y bosque se encuentran limitados por la disponibilidad de nutrientes, y responden favorablemente a las adiciones de N y P.

La simulación bajo sistemas de sabana modifica la producción máxima del pastizal a través de un índice de sombreado que depende de la biomasa de hojas del estrato arbóreo y de su cobertura. Existe una limitación adicional sobre la tasa de crecimiento del pastizal impuesta por la partición diferencial de nutrientes entre los componentes arbóreo y herbáceo del sistema.

3.3.2.1 Producción del pastizal y pastoreo

Es posible simular la producción de biomasa de una amplia variedad de pastizales alterando un cierto número de parámetros de sitio específicos sobre las opciones que presenta el modelo. Sin embargo, el modelo Century no fue diseñado específicamente para simular producción de biomasa, de manera que algunos otros parámetros deberían ser re-calibrados o generados localmente, para una mayor exactitud.

En la Figura 3.3 se representan los compartimentos vástago, raíz y material vegetal muerto en pie que componen este sub-modelo. La producción potencial de biomasa (y la consecuente fijación de C, en g m⁻² mes⁻¹) es estimada en función de un máximo impuesto por las características genéticas de las especies involucradas y afectada por factores reductores que adquieren valores entre 0 y 1, los cuales dependen de la temperatura del suelo, de la disponibilidad hídrica, del sombreado que ejerce la vegetación muerta y del crecimiento de nuevas plántulas.

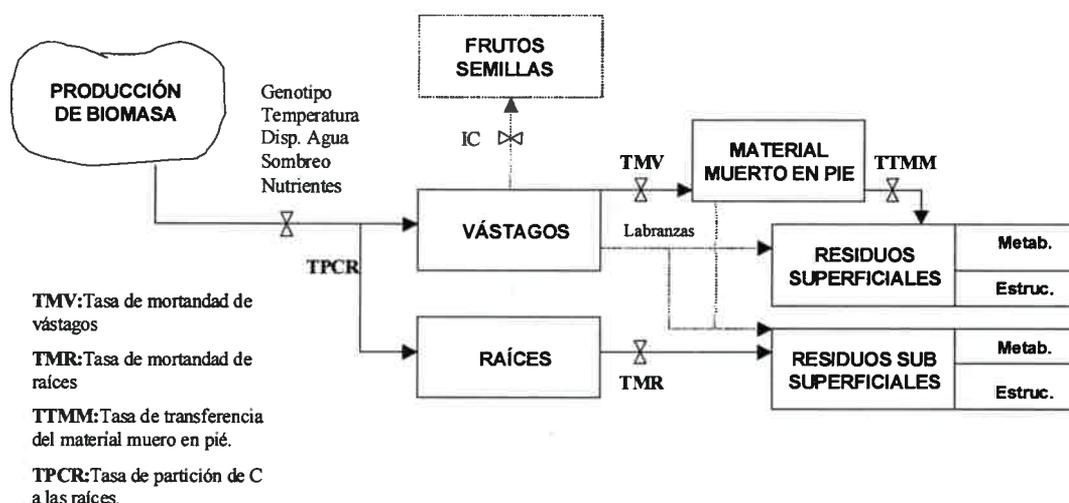


Figura 3.3: Esquema ilustrando la conceptualización del sub-modelo de producción de biomasa en pastizales y cultivos. Durante la simulación de la rutina de pastizal, el compartimento de producción de granos (semillas, frutos) y los flujos de materiales generados por labranzas no son considerados.

La producción potencial máxima, cuando no existen limitantes de temperatura, humedad o nutrientes, es básicamente determinada por el nivel de radiación fotosintéticamente activa, la tasa máxima de asimilación fotosintética, la eficiencia de conversión de asimilados en los diferentes constituyentes de los tejidos vegetales y la tasa de respiración de mantenimiento (van Heemst, 1986). De esta forma, la máxima producción potencial es determinada por componentes genéticos y ambientales.

Sin embargo, en el Century, la distribución estacional de la producción de biomasa es controlada por la función de respuesta a la temperatura, y no así por la variación estacional de la radiación, asumiendo que la producción potencial refleja la que ocurriría en óptimas condiciones en días claros durante los meses de verano. El efecto del sombreado sobre el crecimiento potencial considerado en el modelo es una superficie de respuesta que depende al mismo tiempo de las cantidades de material vegetal vivo y muerto, y que fue inicialmente desarrollado para pastizales altos (Parton *et al.*, 1987).

En general, las especies C4 presentan mayores tasas de crecimiento potencial que las C3, debido a sus mayores tasas de asimilación neta (van Heemst, 1986). Para el rango de tasas de crecimientos potenciales en materia seca de 200 a 580 kg ha⁻¹ día⁻¹ corresponden valores de flujo de C en la biomasa vegetal de 240 a 700 g C m⁻² mes⁻¹.

El crecimiento de la mayoría de las especies vegetales exhibe una respuesta de tipo sigmoideo a la temperatura en la zona radicular hasta una cierta temperatura óptima, se mantiene dentro de una banda de temperaturas dentro de la cual existe poco efecto sobre el crecimiento, y luego declina rápidamente ante mayores incrementos térmicos (Cooper, 1973). La tasa de crecimiento resultante depende de la respuesta combinada de los procesos de fotosíntesis y respiración al incremento de la temperatura.

Para la mayoría de las especies de clima templado la temperatura base para el desarrollo se encuentra entre 0 y 5 °C, aumentando la tasa de desarrollo hasta temperaturas óptimas de 20 a 25 °C, para luego disminuir hasta un límite superior de temperaturas de entre 30 y 35 °C. Para especies tropicales, las temperaturas base, óptima y máxima son aproximadamente 10 °C más altas (Monteith, 1981). En este sub-modelo, la curva de respuesta a la temperatura puede ser parametrizada para cada especie utilizando una función de densidad de Poisson generalizada (Anexo I, Figura I.1).

La disponibilidad hídrica disminuye la producción potencial de biomasa cuando la relación entre la suma del contenido hídrico del suelo en la zona explorada por las raíces más los aportes de agua básicamente por precipitaciones (por riegos, escurrimiento, capilaridad) y la tasa de evapotranspiración potencial adquiere valores menores a 0,8. La pendiente de esta relación lineal depende de la capacidad de retención hídrica del suelo, que varía a su vez con la textura (Anexo I, Figura I.2). Este efecto de la textura fue observado en experimentos de campo (Sala *et al.*, 1988) y explica el efecto de mayores tasas de infiltración y consecuentemente menores tasas de evaporación directa que ocurren en suelos de texturas gruesas, particularmente en regiones áridas.

Por otra parte, de acuerdo a la formulación del modelo, la producción potencial simulada es la correspondiente a la biomasa aérea, siendo necesario considerar la distribución de biomasa entre vástagos y raíces utilizando valores que sean acordes con los observados en condiciones de producción potencial y que varían a lo largo del año. Para representar la dormancia invernal de los pastizales, la relación raíz/vástago se mantiene constante durante los meses en que la temperatura del suelo es menor a 2 °C. En una formulación alternativa (Parton *et al.*, 1987) desarrollada para los pastizales de las "Great Plains" de los Estados Unidos, la relación raíz/vástago es controlada por la precipitación anual.

La producción del pastizal simulada se encuentra limitada por la disponibilidad de nutrientes, manteniendo la concentración de los mismos en los tejidos vegetales dentro de rangos predeterminados, discriminando entre vástagos y raíces. El principio de la "Ley del Mínimo" de Liebig es aplicado, por cuanto el nutriente más limitante es el que define el nivel de producción. Los límites para el rango de concentración de los nutrientes para el crecimiento de la biomasa aérea se definen en función de la biomasa total, a fin de reflejar los cambios en la concentración de nutrientes que ocurren durante el desarrollo (Anexo I, Figura I.3).

Los límites para la concentración de nutrientes en las raíces están en función de las precipitaciones y restringidos de acuerdo a la biomasa de raíces que es capaz de explorar el suelo (Anexo I, Figura I.4).

La muerte de vástagos y raíces durante el período de crecimiento es igualmente simulada, como función del agua disponible en todo el perfil del suelo y en la zona radicular, respectivamente (Anexo I, Figura I.5). La muerte de los órganos aéreos puede verse aún incrementada debido al sombreado si la cantidad de biomasa acumulada supera un cierto valor crítico. La muerte de raíces sólo es simulada cuando éstas se encuentran fisiológicamente activas, es decir, con temperaturas del suelo superiores a 2 °C. Durante los meses establecidos como período de senescencia (variable para cada tipo de pastizal), la muerte de los órganos aéreos se fija en proporción a la biomasa aérea total, y el material muerto en pie es transferido a los compartimentos de residuos superficiales a una tasa de transferencia específica para cada pastizal.

El contenido de lignina promedio de la vegetación del pastizal puede ser especificado para vástagos y raíces, mediante valores constantes, o estimado (por defecto) mediante una función lineal a través del régimen de precipitación anual (Parton *et al.*, 1992). El contenido de lignina siempre debe reflejar aquel que presenta el material vegetal senescente, que efectivamente es incorporado al suelo.

Los efectos del pastoreo y del fuego sobre la producción del pastizal son representados en el modelo empleando datos generados por Holland *et al.* (1992) y por Ojima *et al.* (1990). El mayor impacto del fuego es el incremento de la relación raíz/vástago y de la relación C/N de la vegetación remanente, la remoción de la vegetación (reducción del stand) y retorno de los nutrientes al suelo durante los años en que los incendios ocurren (Ojima *et al.*, 1990). Del mismo modo, el pastoreo remueve

vegetación, retorna nutrientes al suelo y altera la relación raíz/vástago, pero incrementa el contenido de N de la vegetación remanente (Holland *et al.*, 1992).

El modelo presenta tres opciones para estimar el impacto del pastoreo. La primera de ellas (GRZEFF=0) no hay un impacto directo sobre la producción del pastizal, exceptuando la remoción de vegetación y el retorno de nutrientes mediante las excretas. La segunda opción (GRZEFF=1) representa un efecto leve e incluye un valor constante para la relación raíz/vástago (no afectada por el pastoreo) y una disminución lineal de la producción del pastizal con el aumento de la intensidad de pastoreo.

La tercera opción (GRZEFF=2) simula un efecto más pronunciado y utiliza una curva de optimización del pastoreo compleja (Holland *et al.*, 1992), según la cual la producción aumenta con intensidades de pastoreo moderadas y decrece abruptamente con intensidades altas (por ej. más de 40 % de remoción mensual). La relación raíz/vástago se mantiene constante para intensidades de pastoreo entre leves y moderadas, y aumenta rápidamente con intensidades altas. En ésta, como en las opciones anteriores, la concentración de nutrientes en los rebrotes aumentará de acuerdo a la cantidad de biomasa aérea remanente.

3.3.2.2 Bosques y sabanas

El *sub-modelo de crecimiento forestal* (Figura 3.4) divide al estrato arbóreo en hojas, raíces finas, ramas finas, tallos leñosos (madera) y raíces leñosas, y distribuye al C y a los nutrientes entre ellas de acuerdo a un esquema de partición fijo. La máxima producción mensual bruta es calculada a través del producto de la tasa de producción máxima y una serie de índices que representan el efecto de la disponibilidad de agua, de la temperatura del suelo y del área foliar efectiva (hojas funcionales).

Los efectos de la temperatura y de la disponibilidad hídrica sobre la producción potencial son los mismos que los empleados en el sub-modelo de producción del pastizal (Anexo I), mientras que el efecto del índice de área foliar sobre la producción es ilustrado en el Anexo I, Figura I.6. La tasa de respiración de la biomasa es calculada en función del contenido de N de la madera y de la temperatura, mediante una ecuación desarrollada por Ryan (1991) y sustraída de la tasa de producción bruta para obtener la tasa de producción neta, la cual no puede superar al producto entre la tasa máxima de

producción neta específica del rodal y los índices que representan a los factores limitantes.

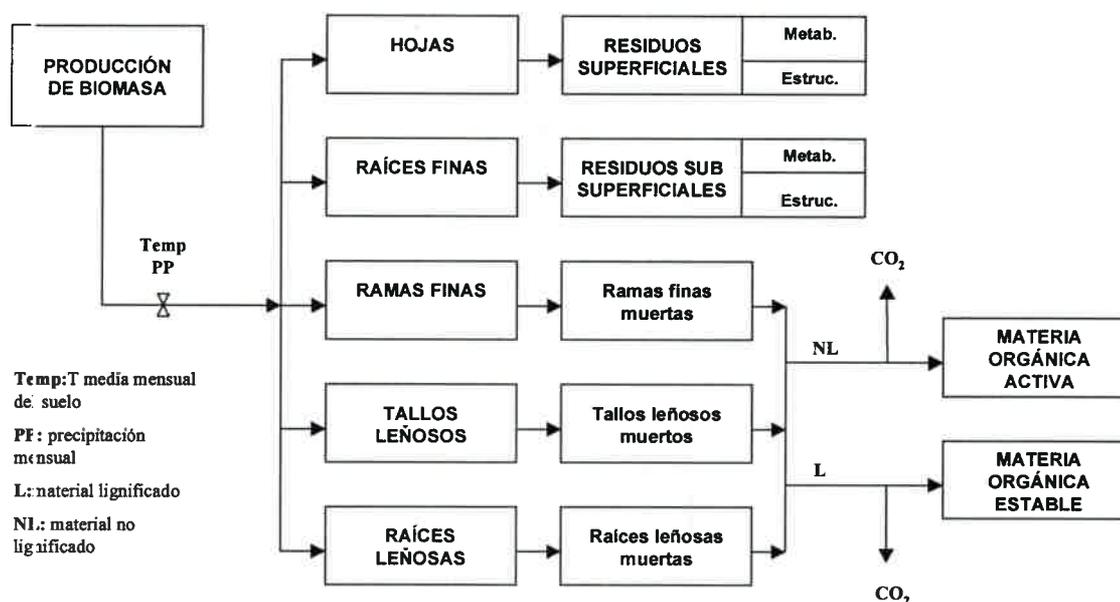


Figura 3.4: Esquema ilustrando la conceptualización del sub-modelo de crecimiento forestal en el Century.

El sub-modelo presenta una serie de supuestos en relación a la partición de la fracción leñosa entre activa y no activa que exceden los alcances de este trabajo y que pueden ser consultados en la bibliografía original (Ryan, 1991). Sólo la fracción activa es atacada por los microorganismos, con liberación de CO_2 , y su proporción sobre la fracción leñosa total es determinada de acuerdo a la curva del Anexo I, Figura I.7, la cual es también empleada para la fracción activa de raíces.

La cantidad de biomasa foliar adquiere un valor máximo que es función de la cantidad de biomasa leñosa activa (RATLTM) (Anexo I, Figura I.8). Esta función, que especifica el efecto de la estructura arbórea sobre el área foliar máxima, es potencialmente diferente para distintas especies forestales. De esta forma, los parámetros específicos más importantes que definen a cada masa forestal son las tasas de producción bruta y neta de biomasa, la relación entre el índice de área foliar y la biomasa leñosa, la partición de C entre biomasa leñosa activa y no activa, y la distribución del C entre los diferentes órganos vegetales (compartimentos).

El sub-modelo presenta diferentes patrones de distribución de C para masas forestales jóvenes y maduras, así como para bosques caducifolios y perennifolios. Para

estos últimos la tasa de mortandad foliar es establecida en forma específica para cada mes del año, mientras que para bosques caducifolios la misma aumenta abruptamente durante los meses de senescencia. Además, para este tipo de bosques la tasa de crecimiento foliar es mucho más elevada durante los primeros meses de desarrollo foliar en cada estación de crecimiento.

La biomasa de hojas senescentes, así como de las raíces finas es transferida a los compartimentos de residuos vegetales superficiales y subsuperficiales, respectivamente, y distribuidas entre las fracciones estructurales y metabólicas (Figuras 3.1 y 3.4). La incorporación de biomasa foliar al suelo requiere ciertos ajustes cuando la misma es provocada por remoción (tala) u otro tipo de disturbios. En tales casos, la concentración foliar de nutrientes corresponde a la de hojas activas y por lo tanto, la tasa de retorno de los mismos es mayor.

Los compartimentos que representan a la biomasa muerta de ramas finas, madera y raíces gruesas (Figura 3.4) reciben aportes de materia desde sus correspondientes fracciones activas (leñosas), y cada una de esas transferencias es gobernada por una tasa específica. Finalmente, los compartimentos de biomasa leñosa muerta transfieren materia al suelo (Figura 3.4) siguiendo el mismo mecanismo de descomposición de los residuos vegetales estructurales, la fracción lignina se dirige a la fracción orgánica estable y la restante hacia las fracciones activas superficiales y subsuperficiales. Las tasas de transferencia de las fracciones leñosas al suelo son afectadas por factores de reducción que dependen del efecto de la temperatura y la humedad sobre la tasa de descomposición, e incluyen el cálculo de las pérdidas de CO₂ por respiración durante este proceso.

El *sub-modelo de sabana* es un sistema mixto bosque-pastizal y utiliza ambos modelos descritos en forma conjunta. La diferencia fundamental en este caso es que la producción total es obtenida mediante la suma de las producciones del bosque y del pastizal. Esta última, sin embargo, es afectada por efecto del sombreado mediante el cálculo de un factor de reducción que depende de la cobertura y de la biomasa foliar del estrato arbóreo (Anexo I, Figura I.9). De esta forma, el aumento de la cobertura y/o de la biomasa foliar forestal, disminuye la producción de pasto.

El efecto del fuego puede ser igualmente simulado bajo el sistema sabana en forma independiente para ambos estratos vegetales, de manera que la frecuencia e intensidad de incendios puede ser ajustada para cada situación. De esta forma, las

quemadas de pastizales pueden ocurrir con mayor intensidad y frecuencia, aún sin generar pérdidas por combustión del estrato leñoso. En este sub-modelo se asume que la distribución y el establecimiento de las especies forestales no son regulados ni influidos por el fuego.

La competencia por N es otro de los ejes centrales que describen la interacción entre ambos estratos de vegetación. Los factores que controlan dicha interacción en el modelo son el área basimétrica del estrato arbóreo, la disponibilidad de N total y las características de sitio (potenciales) que definen a la producción forestal. La fracción de N disponible para la absorción por el estrato arbóreo es calculada en función del área basimétrica ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$) y del N mineral disponible (Anexo I, Figura I.10).

La fracción de N disponible para la absorción por el pastizal es igual a uno menos la fracción absorbida por el estrato arbóreo. Si el pastizal no absorbe todo el N disponible, el remanente es adicionado a la fracción de N disponible para el estrato arbóreo.

Dos parámetros de sitio específicos en el submodelo sabana son el factor de potencial de sitio (SITPOT) y el factor de conversión del área basimétrica, que calcula su valor en función del nivel de C presente en el compartimento de biomasa leñosa del estrato arbóreo. El parámetro SITPOT controla en qué medida el pastizal es dominado por el bosque con el mínimo número de individuos posibles en este último.

3.3.3 El sub-modelo de N

El sub-modelo de N presenta una estructura similar al correspondiente a C orgánico (Figura 3.5). El flujo de N sigue los mismos pasos que el de C y se estima a través de la magnitud de estos últimos y de la relación C/N de la variable de estado que recibe el C. La relación C/N de los compartimentos estructurales (150) es mantenida constante, mientras que el contenido de N en los compartimentos metabólicos varía en función del contenido de N del material residual aportado, así como la relación C/N de la biomasa microbiana superficial que se genera como consecuencia (aumenta cuando los residuos presentan poco N).

La relación C/N de la materia orgánica que ingresa a cada una de las fracciones orgánicas edáficas varía en función lineal con el contenido de N mineral (Figura 3.5). Así, a medida que el contenido de N en el horizonte superficial aumenta de 0 a 2 g m^{-2} ,

las relaciones C/N decrecen de 15 a 3 para la fracción activa, de 20 a 12 para la fracción estable y de 10 a 7 para la fracción pasiva. La relación C/N de la fracción estable generada a partir de la biomasa microbiana superficial depende y es función de la relación C/N de esta última.

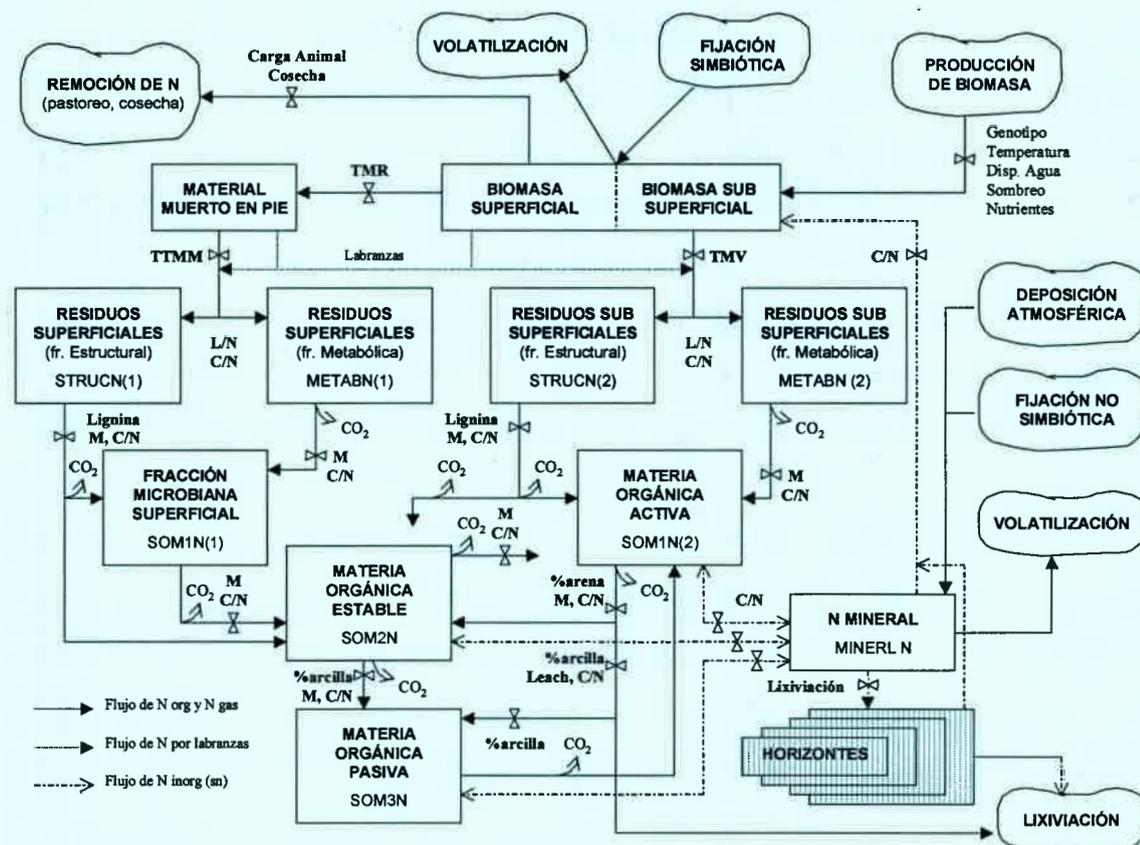


Figura 3.5: Esquema representando la conceptualización del sub-modelo de N en el Century.

El modelo asume que el N asociado con la fracción de C que se pierde durante la respiración (30 a 80 % del flujo de C es respirado) es mineralizado. Dadas las relaciones C/N de cada una de las variables de estado y las pérdidas por respiración microbiana asociadas a cada flujo de C en el sistema, los procesos de descomposición de los residuos metabólicos y de las fracciones activa, estable y pasiva determinan la mineralización neta de N, mientras que la descomposición de los residuos estructurales determina la inmovilización de N.

El modelo utiliza ecuaciones simples para representar los aportes de N por deposición atmosférica y por fijación (del suelo y de la vegetación). La deposición atmosférica es una función lineal del régimen de precipitaciones. Para el cálculo de la tasa de fijación de N por el suelo, el modelo permite optar entre el empleo de una

función que depende de la relación entre el contenido de N mineral y de P lábil (alta tasa de fijación a menores N/P) o, del mismo modo, de una función lineal del régimen de precipitaciones. Sólo se asume la ocurrencia de fijación simbiótica cuando el N mineral es insuficiente para abastecer los requerimientos de la vegetación, y su valor puede alcanzar un cierto nivel de g N fijado por g C fijado, específico para cada pastizal y en relación a su tasa de crecimiento (Parton *et al.*, 1994).

Las pérdidas de N por lixiviación se encuentran relacionadas con la textura y con la dinámica del agua dentro del perfil. Tales pérdidas son acumuladas en la capa inferior del último horizonte de suelo considerado o se pierden por percolación profunda. Pérdidas de N orgánico sólo ocurren en forma asociada a la lixiviación de materia orgánica. El modelo calcula, asimismo, las pérdidas de compuestos gaseosos nitrogenados generados en los procesos de mineralización, nitrificación, desnitrificación y volatilización (pastizales maduros, senescentes). Por último, las pérdidas de N debidas al fuego, a la transferencia en las heces animales y a los procesos erosivos son igualmente consideradas.

Capítulo 4: Caracterización regional

El área bajo estudio comprende la región centro este de la Provincia de San Luis y centro sur de la Provincia de Córdoba en un gradiente de condiciones ambientales y de material originario de suelos que integra los diferentes ambientes de la región, desde la zona serrana y pedemonte del sistema de Comechingones, pasando por las llanuras eólicas loésicas y arenosas bien drenadas, con relieves normales a subnormales, hasta la zona de imperfecto o mal drenaje del sudeste de Córdoba.

4.1 Selección y descripción de las situaciones a estudiar

La coexistencia de zonas de colonia agrícola sometidas a elevada presión de uso durante los últimos cien años, otras de reciente incorporación mediante desmonte, zonas típicamente -por razones biofísicas pero también culturales- ganaderas extensivas, así como las situaciones intermedias y las particularidades de la actividad antrópica en cada sub-región, conforman un mosaico interesante de situaciones, y de gran utilidad para la aplicación de los distintos modelos.

El desarrollo de determinadas actividades en una cierta sub-región responde a múltiples variables socioeconómicas, culturales y, por supuesto, ambientales. Sin embargo, es la definición de resistencia y resiliencia de los ecosistemas transformados la que permite ligar los aspectos ecológicos y utilitarios, debido a su interrelación causal. Bajo esta conceptualización, es posible acotar la variabilidad de combinaciones entre atributos ambientales y esquemas de uso de la tierra observada, y seleccionar un número de situaciones representativas que caractericen a cada sub-región identificada.

De esta forma, según la información disponible, fueron utilizados dos criterios centrales para la adopción de un sistema de subdivisión geográfica de entre los varios existentes, así como para la selección de las situaciones a estudiar (Figura 4.1). En primer lugar se empleó el criterio de gradientes ambientales (bio-físicos) a diferentes niveles jerárquicos (Tittonell, 2004).

- A nivel regional se jerarquizaron los gradientes geológicos -fundamentalmente granulometría y estratigrafía de los sedimentos-, geomorfológicos y climáticos.

- A nivel sub-regional, fueron jerarquizadas las variaciones en los tipos fisonómicos de la vegetación y en la distribución de suelos.

- A nivel local se empleó además el segundo criterio central, uso de la tierra actual e histórico, aunque en estrecha relación con diferenciaciones más detalladas de los aspectos geomorfológicos, edáficos (toposecuencia) y florísticos.

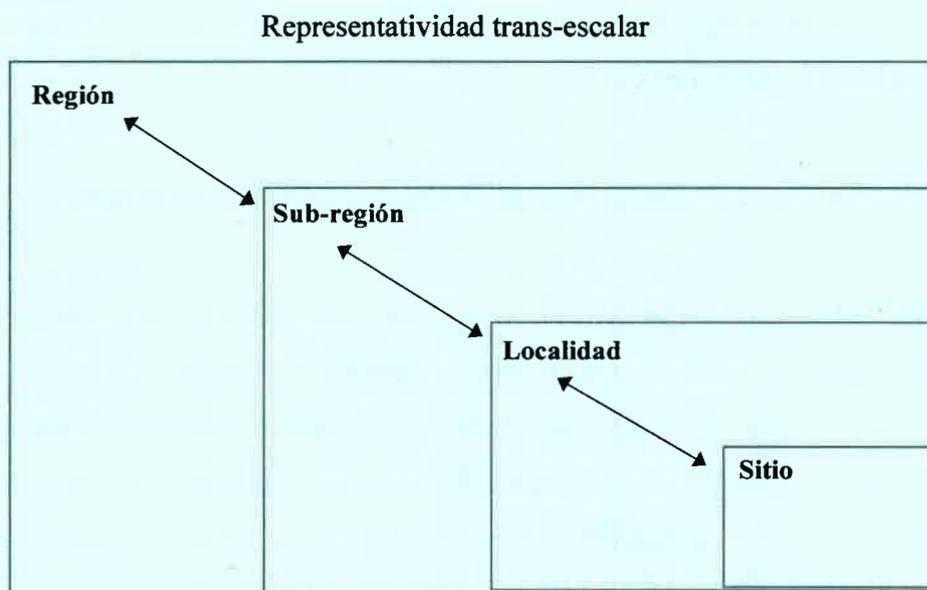


Figura 4.1: Esquema ilustrando el criterio de representatividad de las observaciones a través de diferentes escalas. La selección de situaciones a estudiar se realizó de modo que lo observado en un determinado sitio sea representativo para la localidad o área, y que ésta a su vez represente a las situaciones modales dentro de la sub-región. Las sub-regiones representan las grandes unidades geomorfológicas en que puede dividirse a la región central de Argentina.

Es necesario destacar que la jerarquización de los factores relevantes para el análisis de la génesis y evolución de la materia orgánica edáfica a nivel de ecosistema, responde a su vez a los requerimientos en calidad y cantidad de información necesaria para “alimentar” al modelo. Por ejemplo, las características del material originario del suelo, de los regímenes hídricos y térmicos, y de la vegetación natural, son los factores de mayor peso en el contexto conceptual del modelo Century, es decir, aquellos para los cuales el modelo presenta mayor sensibilidad (Parton *et al.*, 1992). Se destaca que en la región bajo estudio, entre los gradientes ambientales seleccionados, existe una clara continuidad estructural y funcional en la región.

En segundo lugar, un factor de índole práctica fue la de mayor relevancia a la hora de seleccionar las situaciones a estudiar: la existencia de una condición ecológica

con escasa alteración, es decir, lo más “parecido” al estado estacionario natural del ecosistema, que garantice representatividad en las características cuali-cuantitativas de la fracción orgánica como consecuencia de los factores formadores confluyentes, sin incluir al factor antrópico en forma directa.

Este tipo de condiciones, como es de esperar, fueron halladas con mayor frecuencia en zonas predominantemente ganaderas. Por el contrario, en diversas situaciones de predominio agrícola, como en las zonas de “colonia” (de elevada fragmentación espacial) e incluso en zonas mixtas, la identificación de tales condiciones “naturales” fue prácticamente imposible y se recurrió a situaciones de baja alteración o en recuperación prolongada con leve intervención. Diferentes soluciones de compromiso fueron consideradas y supuestos asumidos para resolver la ausencia de información, y serán debidamente explicitadas en cada caso. No obstante, para cada situación, se identificaron amplias variantes en el patrón de uso y manejo histórico y actual de la tierra, a fin de corroborar la sensibilidad del modelo frente a este tipo de variables.

4.2 El área de trabajo

El área sobre la cual se realizó el relevamiento para el presente trabajo corresponde a las porciones Sur de la Provincia de Córdoba y Centro-Este de la Provincia de San Luis, Argentina, entre los 32° 30' y 35° 00' grados de Latitud Sur y entre 63° 00' y 66° 00' de Longitud Oeste (Figura 4.1). Sin embargo, el alcance regional de los resultados de esta validación incluye a las regiones periféricas contiguas de las provincias de La Pampa, Buenos Aires y Santa Fe, hasta donde se extienden las mismas condiciones agroecológicas representadas en el área relevada.

El área de trabajo propiamente dicha (Figura 4.2) abarca la zona comprendida entre el extremo sur del sistema serrano de Comechingones (desde la localidad de Alpa Corral hacia el sur) y su pedemonte oriental, al oeste de la región, atravesando todo el gradiente de factores ambientales y de uso de la tierra sobre las llanuras eólicas loésicas y arenosas bien drenadas, con relieves normales y subnormales, hasta el extremo sudeste de la Provincia de Córdoba (zona de influencia de las localidades de La Carlota y Laboulaye). Esta última es una zona representativa de las condiciones de humedal salino que abarcan buena parte del centro de Argentina.

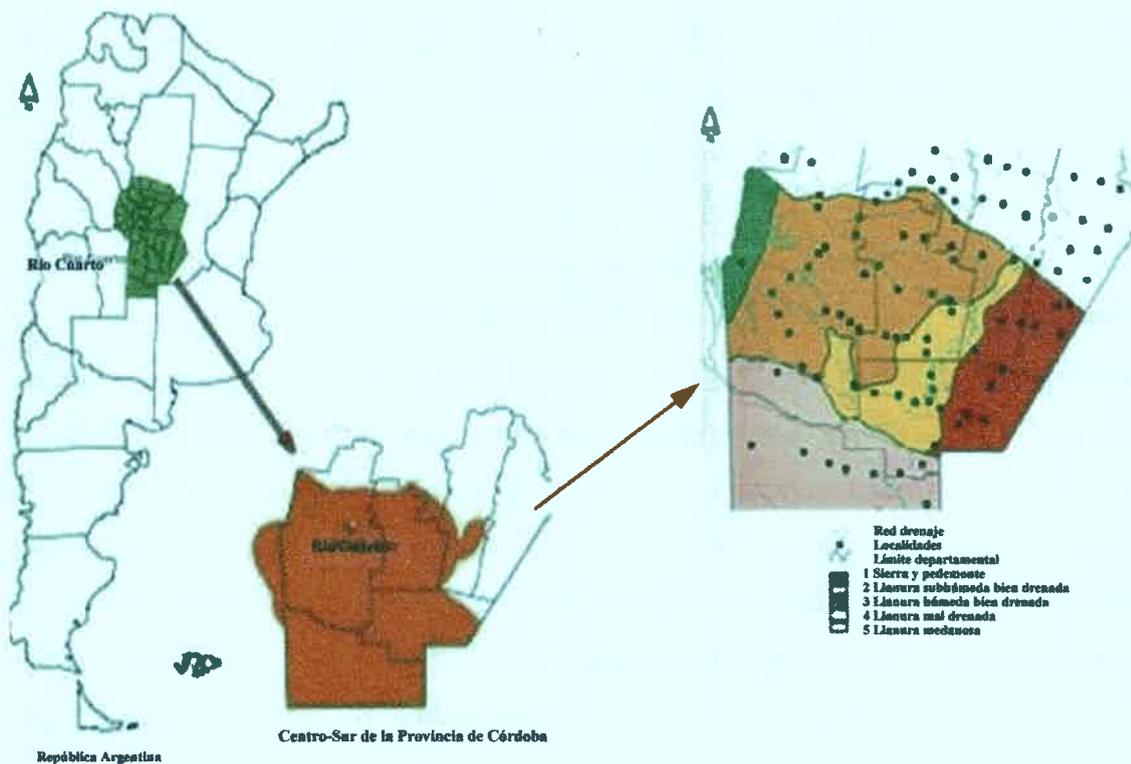


Figura 4.2: Ubicación geográfica del área de trabajo. Mapa de la República Argentina (escala aproximada. 1:10.000.000) indicando las unidades ambientales con división geopolítica y las principales poblaciones de la misma.

El límite norte del área bajo estudio lo constituye aproximadamente la porción sur de la cuenca del arroyo Tegua, abarcando las zonas agrícolas aledañas a las localidades de General Deheza (en especial hacia el oeste de la misma) y General Cabrera, y una línea convencional que sigue en dirección sudeste hacia las localidades de Uacha y Santa Eufemia. El límite sur lo constituye aproximadamente el cauce del río Quinto, incluyendo a las zonas mixtas y ganaderas sobre suelos arenosos de Vicuña Mackenna, Villa Valeria y Villa Mercedes en la Provincia de San Luis, y hacia el sudoeste se incluye una zona medanosa de drenaje arreico-endorreico, principalmente ganadera extensiva, que se extiende hacia el sudeste de esta provincia, hasta la localidad de Buena Esperanza.

De esta forma, el área bajo estudio incluye sub-regiones con paisajes claramente diferenciados por sus atributos climáticos, geológicos, geomorfológicos e hidrológicos, y por su funcionalidad, así como por su vocación cultural y uso histórico y actual de la

tierra. Los mismos fueron agrupados, a gran escala y siguiendo a Cantero *et al.* (1998a), de la siguiente forma:

- 1.- Llanuras bien drenadas
- 2.- Llanuras mal drenadas
- 3.- Llanuras medanosas
- 4.- Área serrana y pedemontana

Las dos primeras sub-regiones se encuentran definidas en el extremo sur de la Provincia de Córdoba, mientras que las últimas incluyen además la porción centro-este de la Provincia de San Luis. Estas áreas fueron subdivididas de acuerdo a los criterios biofísicos de mayor importancia en cada caso (geológicos, geomorfológicos, florísticos) para una mejor diferenciación de los factores relevantes en la determinación de los niveles de materia orgánica edáfica. A un nivel de mayor detalle, se seleccionaron ambientes “tipo” de acuerdo a la división por regiones y asociaciones geomorfológicas, y/c por comunidad vegetal en ciertos casos, siguiendo los criterios desarrollados por una serie de autores en diversos estudios previos para la región (Anderson *et al.*, 1970; Peña Zubiarte *et al.*, 1980; Cantú y Cantero, 1981; Cantero *et al.*, 1981, 1986; Cantú y Degiovanni, 1984; Bianco *et al.*, 1987; Kraus *et al.*, 1999). La Figura 1 del Anexo II.1 muestra la división según asociaciones geomorfológicas realizada por Cantú y Degiovanni (1984), y que constituye uno de los criterios centrales para la agrupación de componentes ambientales en el presente trabajo.

4.3 Caracterización agroecológica de las sub-regiones

Para caracterizar a las sub-regiones se profundizó en aquellos factores de mayor importancia en el control de los niveles de materia orgánica edáfica, y que por otra parte resultan ser aquellos para los cuales el modelo Century muestra mayor sensibilidad (Tittonell, 2004). Son, en definitiva, los que definen el carácter de su validación y su utilidad. Sin embargo, el criterio de selección de situaciones varía entre sub-regiones. Por ejemplo, el efecto del drenaje resulta más importante para la sub-región Llanuras mal drenadas, mientras que el efecto de la vegetación adquiere mayor peso en paisajes donde

conviven formaciones vegetales herbáceas y arbóreas. En todos los casos, no obstante, se hará explícito el criterio empleado.

4.3.1 Llanuras bien drenadas

Esta sub-región ocupa el sector noreste del área bajo estudio, abarca una superficie cercana a las 1.500.000 ha, y comprende la mayor parte de los departamentos de Río Cuarto y Juárez Celman, así como una porción del sector sur de los departamentos de Calamuchita, Tercero Arriba, San Martín, Unión y Marcos Juárez, en la Provincia de Córdoba. Es la zona productiva de mayor importancia agrícola en el sur de esta provincia -y de la región en general- y es por ello que presenta el mayor grado de intervención antrópica, resultando dificultoso el hallazgo de situaciones naturales o de baja alteración (Imagen 4.1).



Imagen 4.1: (arriba) Situaciones contiguas de elevada y baja alteración antrópica; (centro) Cultivos en franjas; Fotografías tomadas en un establecimiento ubicado 30 km al N de la localidad de Gral. Cabrera; (abajo) Cosecha de maní cerca de Chaján.

Limita al oeste con la estrecha faja pedemontana de las sierras de Comechingones, hacia el sudoeste y en ocasiones a través de suaves gradientes con las llanuras medanosas (ruta nacional n° 7, en forma aproximada), y hacia el sudeste con las llanuras mal drenadas, presentando ingresiones recíprocas de ambos tipos de paisaje a lo largo de sus límites. El límite norte fue establecido siguiendo aproximadamente el curso del arroyo Tegua, desde la localidad de Gigena hasta su confluencia con el arroyo Carnerillo, y de allí hacia el sur-sudeste (ruta provincial n° 4) en dirección de Uacha, Santa Eufemia y La Carlota. El río Cuarto atraviesa a la sub-región por su parte central, transportando los caudales recolectados por los ríos que nacen en la pendiente oriental de las sierras.

Posee un gradiente de altitud de 600 a 200 msnm, y se caracterizan por un relieve que varía desde fuertemente ondulado, al oeste (pendientes de hasta el 7 %), a plano hacia el este (pendientes inferiores al 1 %). Toda la región está surcada por ríos y arroyos que nacen en la región serrana a los que se suman otros originados en depresiones tectónicas de la llanura. La mayoría de éstos exhiben importantes procesos de erosión vertical y lateral y consecuente sedimentación en las áreas de derrame.

4.3.1.1 Diferenciación geomorfológica interna, origen y granulometría de los sedimentos

La sub-región presenta una elevada heterogeneidad interna que permite su subdivisión, especialmente mediante criterios geológicos y geomorfológicos. Pertenece a lo que Cantú y Degiovanni (1984) denominaron "Región eólica-loésica subhúmeda" (Figura 1 del Anexo II), caracterizada por la dominancia de rasgos geomorfológicos que responden a una dinámica eólica, mientras que los fenómenos hídricos aparecen subordinados (formas más antiguas, aisladas, parcialmente cubiertas). Estos autores describen cinco asociaciones geomorfológicas diferentes dentro de la sub-región bajo estudio, las cuales serán consideradas para subdividir el área, aunque no siempre en forma estricta ya que el interés en este estudio es sobre los gradientes de aquellos factores que controlan los niveles de materia orgánica edáfica.

La subdivisión propuesta distingue:

- "*llanuras bien drenadas fuertemente onduladas*", que corresponden a la asociación geomorfológica "Faja eólica ondulada periserrana", de acuerdo a Cantú y Degiovanni (1984).

- "*llanuras bien drenadas moderado a suavemente onduladas*" (Bricchi, 1996), corresponden a la asociación "Planicie loéssica antigua de Malena", e incluye a las "Depresiones tectónicas nacientes de arroyos" que se presentan como áreas mal drenadas dentro de la sub-región y que no serán incluidas en este estudio.

- "*llanuras bien drenadas con relieve subnormal*", que corresponden a áreas planas, con la freática profunda, y que presentan sectores de paisaje eólico sobrepuesto. En el presente estudio se consideraron dentro de esta sub-región, las asociaciones que los autores citados denominaron "Planicie de acumulación-deflación de General Cabrera" y parte de la "Planicie de acumulación-deflación, con lagunas, de Uacha" (Cantú y Degiovanni, 1984).

Una descripción más detallada sobre las sub-regiones bajo estudio, se presenta en el Anexo II.2.

4.3.1.2 Aspectos climáticos

La sub-región presenta un clima templado subhúmedo con estación seca, mesotermal, y con variaciones asociadas a la evolución de los gradientes hidro-térmicos regionales y sub-regionales, ligados al control que ejercen las sierras hacia el oeste. Las estaciones meteorológicas en la zona han sido instaladas en los últimos años, razón por la cual en muchos casos las series de datos no son prolongadas. Muchos de los datos empleados -especialmente pluviométricos- han sido obtenidos por cesión de los productores locales y publicados en trabajos previos (ver Tabla 1, del Anexo II.3).

La temperatura media anual en las proximidades de Gral. Deheza es de 16,5 °C, con una amplitud térmica entre la media del mes más cálido (enero 22,8 °C) y la del mes más frío (junio 9,6 °C) de 13,2 °C. Esta amplitud es mayor hacia el sur (Río Cuarto) donde las medias oscilan entre 8,8 y 23,5 °C, para los meses más frío y más cálido, respectivamente, aunque con una media anual similar, 16,5 °C (Ravelo y Seiler, 1978/79). Hacia el oeste de la sub-región, en la unidad llanuras fuertemente onduladas (La Aguada, período 1994-1999) se midieron valores correspondientes de 9,8 y 23,3 °C, con una media anual de 16,6 °C.

Las lluvias en la zona se producen principalmente por el choque frontal de masas de aire cálido y húmedo del N-NE contra masas de aire frío y seco del S-SE, aunque la influencia de fenómenos convectivos locales aumenta con la proximidad a las sierras. El promedio de precipitaciones anuales es de 757 mm, con un valor de 1106 mm para los tres años más lluviosos y de 561 mm para los tres más secos (período 1951 -1994). Entre octubre y febrero llueve en promedio el 66,7 % del total anual (43 – 82 %). Valores similares se verifican en aproximadamente la misma franja longitudinal de norte a sur dentro de la sub-región, aunque existe un aumento considerable de la cantidad, intensidad y variabilidad de las precipitaciones hacia el oeste (Por ejemplo: Los Chañares: 912 mm, La Aguada: 822 mm, Las Lajas: 866 mm. ver Anexo II.3).

4.3.1.3 Hidrología

4.3.1.3.1 Ríos y arroyos

El régimen hidrológico torrencial de la mayoría de los ecosistemas fluviales de esta unidad, depende de las precipitaciones sobre el área serrana ya que, en muy pocos casos, estos cursos nacen en llanura. Los arroyos, en general presentan un patrón meándrico de baja sinuosidad, fajas aluviales angostas, profundas, con terrazas poco manifiestas o ausentes, desarrolladas sobre sedimentos eólicos. Regionalmente evidencian un notorio proceso de profundización, al que se subordina la migración lateral (Imagen 4.2). El río

Cuarto, desde su salida extra-serrana presenta un diseño de drenaje que varía desde meándrico de baja a alta sinuosidad. Su llanura aluvial, en algunos sectores de hasta 5 km de ancho,



Imagen 4.2: Erosión hídrica en relieve ondulado

presenta por lo menos tres niveles de terrazas bien manifiestos. En toda la faja dominan los sedimentos areno-gravosos que se hacen más finos hacia el Este, que en cualquier posición de la cuenca superan los cientos de metros. En este curso los procesos de migración lateral y de profundización son muy significativos.

Todos los cursos de esta unidad durante las crecientes manifiestan erosión de márgenes y de fondo del lecho, lo que ocasiona severos riesgos y daño directo a la infraestructura vial y urbana. Esta situación se manifiesta frecuentemente a lo largo de 2.500 km de cursos superficiales de la región. La vegetación periférica, muy heterogénea e integrada especialmente por plantas exóticas, protege a las costas de la erosión (Cantero *et al.*, 1998a).

4.3.1.4 Formaciones vegetales originales y actuales

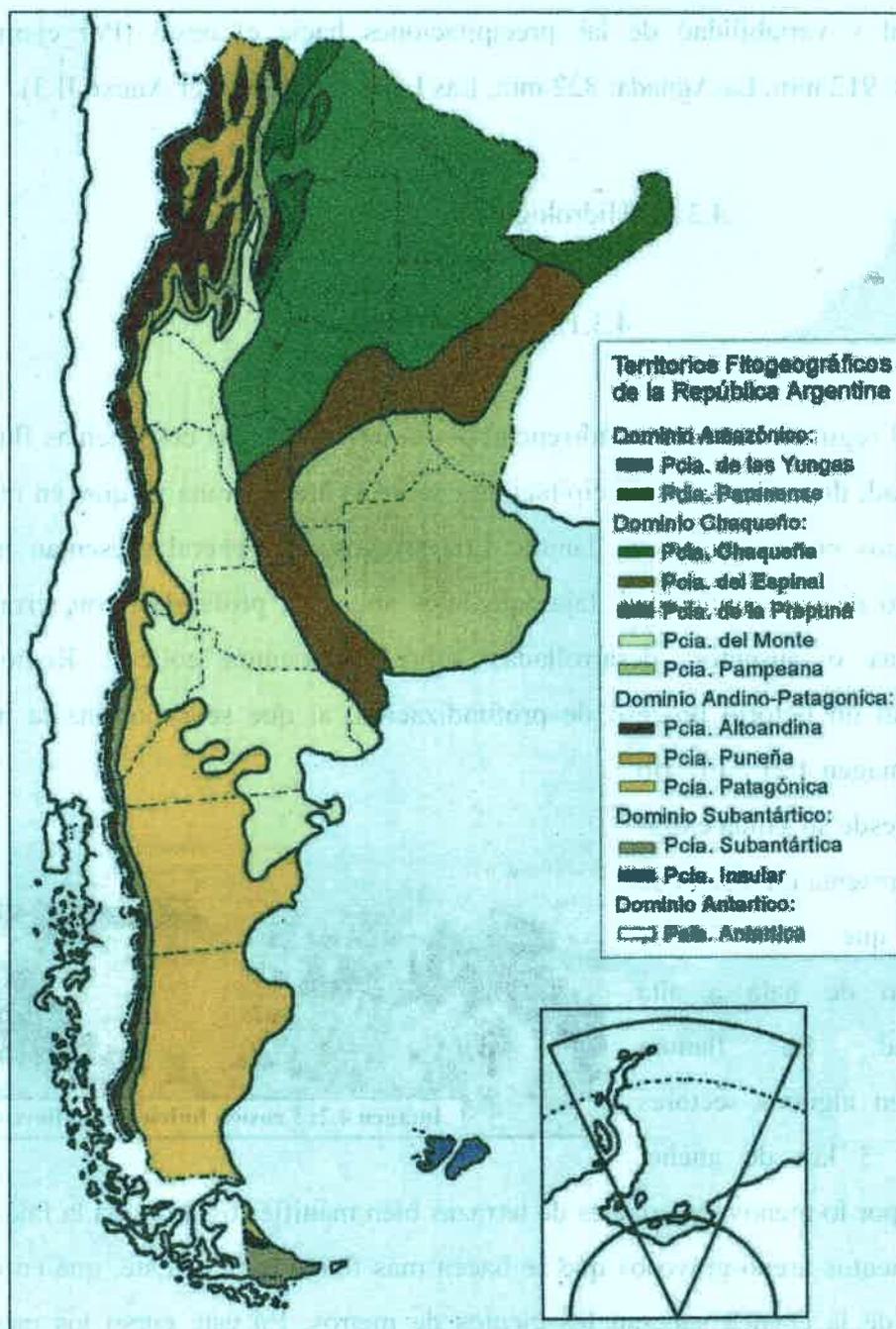
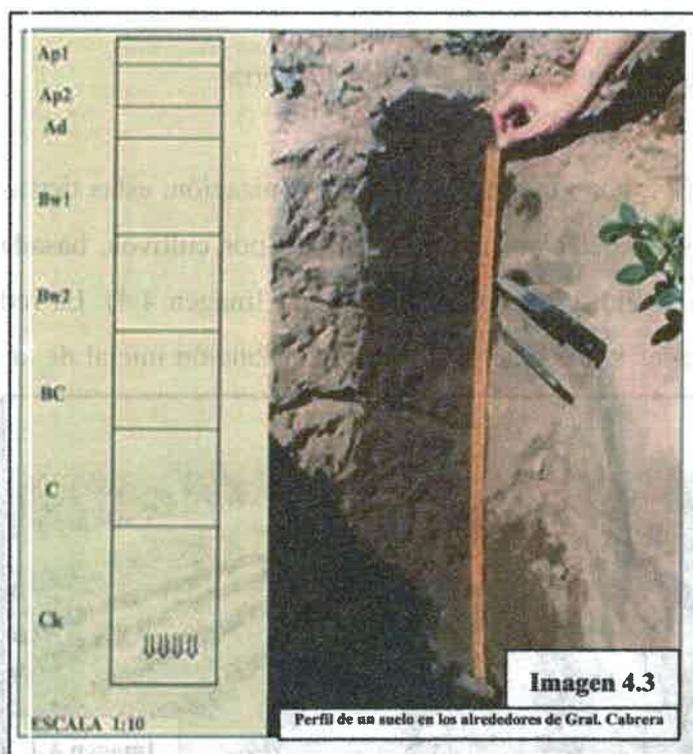


Figura 4.2: Territorios Fitogeográficos de la República Argentina. Adaptado de Cabrera (1971).

La mayoría de los autores (Cabrera, 1976; Luti *et al.*, 1979; León y Anderson, 1983; Bianco *et al.*, 1987) describen para esta sub-región dos provincias fitogeográficas: “El espinal” (Distrito del Algarrobo) hacia el oeste y el centro, y la “Pampeana” (Distrito Occidental) hacia el este, sólo en un pequeño sector. Sin embargo, la desaparición de los bosques de Algarrobo y de otras leñosas que predominaban en la sub-región, provocó el avance de la estepa pampeana hacia el oeste, dificultando su delimitación. Las formaciones boscosas se reducen actualmente sólo a los márgenes de los cursos de agua. De acuerdo con Bianco *et al.* (1987), por su fisonomía y composición florística actual se puede dividir a la sub-región en tres unidades de vegetación: la “Estepa gramínea con isletas de quebracho blanco”, la “Estepa gramínea” y los “Bosques marginales”. Estas unidades de vegetación son descritas en el Anexo II.4.

4.3.1.5 Los tipos de suelo más frecuentes



La amplia variabilidad de la sub-región, particularmente en lo relativo a los aspectos geológicos y geomorfológicos, así como en los tipos fisonómicos de vegetación, determina una variabilidad consecuente en los tipos de suelo presentes. A esto se suma la variabilidad local (toposecuencia) estrechamente relacionada con la clase natural de drenaje, y que es mayor en las situaciones de relieves más

ondulados. Por este motivo, los suelos serán descritos con mayor detalle al analizar las situaciones particulares seleccionadas para su estudio, como las más representativas en la sub-región.

En líneas generales puede destacarse el predominio de materiales originarios más finos en los sectores centro y norte, con texturas entre franco limosas y franco arenosas muy finas, donde los perfiles adquieren mayor desarrollo, observándose horizontes subsuperficiales iluviales con distinto grado de expresión (secuencias Ap-A₂-Bw-BC-C) (Imagen 4.3). En los sectores con materiales más arenosos, y en general hacia el sur y el este se observan perfiles de menor desarrollo (secuencias Ap-AC-C) y situaciones intermedias respecto de la anterior. Hacia el sudoeste de la sub-región el último tipo de suelo indicado, constituye la condición de menor evolución, siendo posible observar perfiles con un menor desarrollo aún (secuencias AC-C).

Los subgrupos de suelo (USDA, 1999) más representativos en toda la subregión son: Ustortentes típicos y líticos hacia el oeste, Hapludoles típicos y énticos en el centro y norte, Argiudoles en los sectores más planos y sin problemas de drenaje, y Haplustoles típicos, énticos y sálicos hacia el este (Cantero *et al.*, 1986). No obstante, es posible encontrar otros subgrupos (Acuoles, Natracuoles y Natralboles entre otros) que se encuentran más ligados a condiciones de intrazonalidad.

4.3.1.6 Evolución en el patrón de uso de la tierra

Desde mediados del siglo XIX, con el comienzo de la colonización, estas tierras sufrieron una total sustitución de su vegetación natural (Espinal) por cultivos, basada fundamentalmente en trigo, alfalfa y lino, y posteriormente maíz (Imagen 4.4). La red ferroviaria y las localidades vinculadas a ella determinaron la distribución inicial de las actividades.

Entre las décadas de 1940 y 1960 se incrementó la producción ganadera, y al mismo tiempo surgió el cultivo de maní como reemplazo de los anteriores, aparejado a los inicios de la



Imagen 4.4

Cultivo de maní en las proximidades de Gral. Cabrera.

mecanización agrícola. Este hecho marcó el comienzo de una etapa caracterizada por una mayor agresividad en el patrón de uso de las tierras, contribuyendo a la

intensificación de la erosión laminar y en cárcavas, y acelerando los procesos de degradación física, química y biológica del suelos (Bricchi, 1996).

Hacia la década del '60 un 50 % de las tierras eran usadas para cultivos anuales de cosecha, mientras que las restantes se distribuían por igual entre la implantación de especies forrajeras anuales y perennes. Los verdeos de sorgo y maíz adquirieron gran importancia durante esta época. El desarrollo de la mecanización en la totalidad de las labores favoreció la intensificación de los modos de producción, y con ello una mayor magnitud en el grado de deterioro de las tierras, particularmente por los procesos de erosión hídrica y eólica aceleradas. Esta tendencia continúa hasta la actualidad, acrecentada por el desarrollo de herramientas de mayor peso y por el incremento de la superficie con cultivos anuales (De Prada, 1994).

En general, la tierra con uso agrícola presenta un predominio de cultivos oleaginosos respecto de los cereales, con tendencia al incremento de la superficie con soja a razón del 12 % anual desde 1996 (Álvarez y Mulín, 2004). A fines del siglo XX, los verdeos de invierno y de verano representaban aproximadamente un 40 % de la superficie destinada a especies forrajeras, mientras que el resto era ocupado por pasturas perennes de alfalfa y pasto llorón, y por pastizales naturales (De Prada, 1994). En la actualidad se observa una tendencia a la simplificación de las actividades agrícolas (monocultivo) y un constante reemplazo de las actividades ganaderas (Alessandría *et al.*, 2001; Álvarez y Mulín, 2004).

En lo referente al régimen de tenencia de la tierra, los regímenes de alquiler (arrendamiento, aparcería, etc.) son bastante comunes y en algunos casos tan frecuentes como los regímenes de propiedad, en especial en áreas de colonia agrícola, donde el grado de fragmentación de la superficie es muy elevado (De Prada, 1994).

4.3.2 Llanuras mal drenadas

La sub-región se ubica en el cuadrante sudeste de la provincia de Córdoba, entre los 33° 20' y 34° 20' sur y los 63° 10' y 64° 00' oeste, en un área que corresponde a los departamentos de Juárez Celman y Roque Sáenz Peña, y que se encuentra aproximadamente delimitada al norte y al sur por las rutas nacionales n° 8 y 7, respectivamente. Ocupa alrededor de 1.200.000 ha, y se caracteriza por presentar condiciones cíclicas o permanentes de salinización, alcalinización, anegamiento-

inundación y sedimentación, debido a que son receptoras finales de todos los sistemas hídricos de la región (Imagen 4.5). Las localidades de La Carlota y Laboulaye son las de mayor importancia en la sub-región, las cuales se encuentran unidas por la ruta provincial n° 4, de dirección sur-norte (Cantero *et al.*, 1998a).



Imagen 4.5: (arriba) Aspecto general de las planicies mal drenadas; (centro) lagunas semipermanentes; (abajo) acumulación de sales en bordes de lagunas. Fotografías tomadas en un establecimiento ubicado sobre la ruta provincial n° 4 en las proximidades de la localidad de Laboulaye, Provincia de Córdoba.

En esta unidad se incluyen extensas áreas plano-cóncavas que constituyen importantes depresiones tectónicas. Entre las más importantes merecen citarse los bañados del Tigre Muerto que reciben las aguas de los arroyos Santa Catalina y El Gato; la depresión de Curapaligüe, La Chanchera, Santa Ana, La Brava que colecta las aguas del Tigre Muerto y Arroyo Ají; los Bañados de La Amarga donde derrama el río Quinto y los bañados del Saladillo que colectan las aguas del río Cuarto y al que, en la mayoría de los casos en forma antrópica, se conducen todos los sistemas de arroyos situados al Sur del río Tercero.

4.3.2.1 El origen de los sedimentos, la evolución del paisaje y su funcionalidad

Esta extensa llanura de 6.500 km² pertenece a la región geomorfológica definida por Cantú y Degiovanni (1984) como fluvial subhúmeda, dentro de la llanura Chacopampeana, específicamente en la asociación geomorfológica “Derrames de los ríos Cuarto y Quinto” (Figura 1 del Anexo II), ya que su génesis corresponde a la acción conjunta de estos cursos de agua, evidenciado a través de una intensa paleoactividad fluvial. Sedimentaciones eólicas posteriores cubrieron parcialmente a estas geoformas iniciales, imprimiéndole sus rasgos actuales.

Según estos autores existen rasgos que indican que las cuencas de ambos ríos confluían en algún punto dentro de la llanura aluvial, probablemente al norte de la localidad de Curapaligüe, aunque actualmente ambos cauces desembocan en forma independiente, el río Cuarto en los bajos del Saladillo y el río Quinto en los bañados de La Amarga. La existencia de dos bloques de magnitud geomorfológica condicionan el drenaje general de la sub-región, causando acumulaciones superficiales y ascenso del nivel freático: el bloque Viamonte - Canals, hacia el este, y el bloque Levalle - Adelia María, hacia el oeste (Cantú y Cantero, 1981).

Hacia el oeste del bloque Viamonte - Canals se desarrolla la faja más baja del sistema, poblada por sistemas de lagunas interconectadas -natural o artificialmente- que presentan una orientación NE-SO aproximada, y que ocupan una superficie de 21.600 ha (Cantero *et al.*, 1988). Las mismas presentan una profundidad variable (entre 0,4 y 2 m), con oscilaciones estacionales en el rango de los 0,5 m, con contenidos salinos de

entre 2 y 40 dS m⁻¹ y, en la mayoría de los casos, los límites de las mismas no están claramente definidos o han sido superados (Cisneros *et al.*, 1999c). Las lagunas de mayor importancia en este sistema son, de norte a sur, La Brava, Assunta, La Salada, Santana, Las Acollaradas, La Chanchera y El Siete.

En la sub-región se reconocen diferentes superficies geomorfológicas: catenas de longitud y pendientes variables, células cóncavas, convexas, planas y sus diferentes combinaciones, las que se vinculan hidrológicamente (Cisneros, 1994). Lunetas de arcilla asociadas a las lagunas en diversas posiciones indican las antiguas líneas de costa en diferentes períodos de evolución, mientras que elementos tales como médanos longitudinales, áreas de acumulación-deflación y médanos dispersos parcialmente activos señalan los efectos de la geodinámica eólica sobre el paisaje actual (Cantú y Degiovanni, 1984).

Existe, por lo tanto, una elevada heterogeneidad en las características de los materiales originarios en toda la llanura fluvial, de acuerdo a la diferente intensidad de los factores formadores del paisaje. En los sectores netamente fluviales las texturas oscila entre francas a franco arcillosas, mientras que para los elementos con rasgos eólicos predominan los materiales franco arenosos a areno francos. Los perfiles de suelo son mucho más evolucionados en los primeros casos, y es posible además encontrar perfiles poligenéticos que indican procesos complejos de formación de suelos, alternando ciclos fluviales y eólicos (Cisneros, 1994).

Por lo tanto, en esta gran unidad pueden distinguirse dos ambientes con características diferenciales: Las "*Planicies y depresiones salino-sódicas*" y las "*Lagunas*". Una descripción detallada de estos ambientes se presenta en el Anexo II.2.

4.3.2.2 Aspectos climáticos

La sub-región se ubica en el dominio semiseco con tendencia al semihúmedo, con gran uniformidad térmica, mesotermal, y sin exceso de agua (Capitanelli, 1979). De acuerdo a la clasificación de Thornwaite presenta un tipo climático subhúmedo-seco (índice hídrico entre 0 y -20). El régimen de precipitaciones es de tipo monzónico, concentrándose el 75 % de las mismas entre octubre y marzo. En la localidad de Laboulaye (34° 08' S; 63° 24' O) el promedio anual de precipitaciones (1903-1973) es de 754 mm (Holguín de Roza, 1986), aunque un análisis posterior involucrando al

período 1917-1990 en la localidad de Pacheco de Melo (50 km al norte de la anterior), arrojó un valor de 725 mm (Cisneros, 1994). La magnitud de la variabilidad de las precipitaciones se advierte a través de los coeficientes de variación mensuales (Tabla II.1 del Anexo II.3). En general, el régimen de altas temperaturas está asociado a situaciones de inestabilidad atmosférica.

Existen cuatro estaciones térmicas: el verano térmico que se extiende desde principios de noviembre hasta principios de marzo y el invierno térmico desde mediados de mayo a fin de julio; las estaciones intermedias, una sin heladas (mes de octubre y primera quincena de marzo) y otra con heladas (agosto, septiembre y mediados de marzo hasta fines de mayo) completan el ciclo anual. La temperatura media es de 16 °C, mientras que las máximas fluctúan por encima de 20 °C y las mínimas por debajo de 10 °C. La máxima absoluta fue de 46,3 °C (enero) y la mínima absoluta de -10,8 °C (julio). Los vientos predominantes son del norte y del sur, aunque la frecuencia de vientos del este aumenta durante el verano, de los del oeste-sudoeste en invierno.

El balance hídrico resultante presenta excesos (Figura II.4 del Anexo II.3) durante tres meses (febrero a abril), déficits en dos épocas del año (mayo a mediados de junio y mediados de noviembre hasta enero, inclusive) que totalizan aproximadamente cuatro meses, y situaciones de equilibrio durante el resto (mediados de junio hasta fines de octubre). La sub-región se encuentra en la zona de transición (de este a oeste) entre los regímenes de humedad del suelo údico y ústico, estimado a partir de valores climáticos (van Wambeke y Scoppa, 1976). Las geoformas existentes y la dinámica hidrológica local y regional determinan la existencia de regímenes de humedad del suelo de carácter ácuico. El régimen de temperatura del suelo corresponde al caracterizado como térmico, con media anual entre 15 °C y 22 °C, y diferencias entre verano e invierno mayores a 5 °C, a los 0,5 m de profundidad.

4.3.2.3 Hidrología

Hidrológicamente esta sub-región constituye un área receptora de flujos superficiales y subterráneos que provienen de los sectores serranos, pedemontanos y de las llanuras bien drenadas (continuidad estructural y funcional), es decir que siempre, recibió y acumuló entropía (agua, sales y sedimentos) desde las otras sub-regiones. Durante el ciclo estival, el carácter hídrico torrencial del sistema serrano que llena los

cursos de agua, y el aporte de sedimentos por erosión de tierras agrícolas en el pedemonte y las llanuras bien drenadas, sumada a la erosión que este incremento de caudal provoca en márgenes y fondos de los cauces (Cisneros, 1994), generan los volúmenes de agua y sedimentos que finalmente adquieren una circulación mantiforme al acceder a las superficies geomorfológicas de baja energía de esta sub-región.

El traslado y acumulación de sales en los acuíferos de esta sub-región responde principalmente a la dinámica de los flujos subterráneos regionales, y puede ser considerada como un área de descarga de freáticas. Su profundidad está en relación con la geoforma considerada y presenta una dinámica basada en recargas estivales y descargas invernales. El comportamiento geoquímico ligado a estos ciclos hidrológicos define la magnitud de las transferencias de iones del perfil y entre unidades del paisaje relacionadas (Cisneros *et al.*, 1996b). El agua como vehículo movilizador, así como también el viento durante el período seco, actúan conjuntamente en la distribución de sales.

4.3.2.4 Formaciones vegetales

De acuerdo a sus formaciones vegetales la sub-región fue incluida inicialmente en lo que la mayoría de los autores denominan “Estepa Pampeana” (Parodi, 1964; Ragonese, 1967; Cabrera, 1971). Con posterioridad, Cabrera (1976) la incluyó en el distrito Pampeano Occidental de la provincia fitogeográfica Pampeana, Lutti *et al.*, (1979) la consideró dentro de la “Vegetación de bañados y lagunas” y León *et al.* (1984) como sub-región “Pampa interior” dentro de la provincia fitogeográfica Pampeana. Luego Bianco *et al.* (1987) identificaron y describieron tipos fisonómicos principales: Monte, Arbustal halófito, Estepa halófito y Pradera halófito, diferenciando al último de acuerdo a la dominancia de gramíneas o suculentas, tomando como base trabajos previos (Cantero y Bianco, 1986a) en los que la vegetación fue estudiada hasta el nivel de especie. En estas publicaciones se destaca la gran riqueza florística y la ingesión de elementos de las provincias fitogeográficas vecinas (Chaqueña, Espinal y Pampeana).

Trabajos más recientes que consideran a la estructura del hábitat, las relaciones ambientales y los aspectos fitosociológicos en la distribución de las especies, e incorporan el empleo de técnicas numéricas más poderosas, han permitido determinar con exactitud los nodos o tipos de vegetación (ver Anexo II.4) presentes en la sub-región

(Cantero, 1993; Cantero y León, 1996, 1999; Cantero *et al.*, 1998b, c; Cantero y Petryna, 1998). Los autores utilizan en forma alternativa el término Comunidad como un nivel de abstracción jerárquica en la organización de la vegetación, y será adoptado aquí con el mismo propósito.

Los diferentes tipos de vegetación fueron agrupados en seis ecogrupos de acuerdo a su distribución según los gradientes ambientales (Cantero y León, 1999), y su relación con la estructura del hábitat fue determinada para la mayoría de los nodos descritos (Cantero *et al.*, 1998c). Esta información y estos criterios fueron empleados para caracterizar en forma detallada a los sitios de trabajo.

4.3.2.5 Tipos de suelo desarrollados en la sub-región

La génesis de suelos en los ecosistemas de esta sub-región es en extremo compleja e involucra variaciones en el material originario, en el relieve y en las condiciones de drenaje. El origen fluvial en varios ciclos de sedimentación, y los posteriores ciclos eólicos con discontinuidad superficial de los materiales originarios, dio como resultado la formación de suelos poligenéticos, presentando con frecuencia discontinuidad litológica en su perfil (Cisneros *et al.*, 1999c). Las condiciones de hidrohalomorfismo prevalecen en el área, aunque su expresión varía a lo largo de la toposecuencia (Imagen 4.6). En cada sector definido del paisaje, el balance entre la intensidad de los procesos de ascenso capilar, infiltración-percolación y escurrimiento superficial definen su grado de hidrohalomorfismo (Koslovski, 1972).

En las posiciones de loma los suelos se desarrollaron sobre materiales eólicos francos o franco-arenosos, dando origen a Hapludoles típicos o énticos (USDA, 1999), con perfiles escasamente diferenciados y drenaje interno algo excesivo. En estas situaciones la oscilación del nivel freático se encuentra por debajo del crítico (Wosten & van Genuchten, 1988), aunque no así hacia las posiciones intermedias más bajas, donde comienza a



evidenciarse la discontinuidad entre materiales eólicos y fluviales sobre los que se desarrollan Haplustoles énticos thapto nátricos, los cuales presentan rasgos de halomorfismo (horizontes Bn) en profundidad y frecuentemente agravados por el uso pastoril (Cisneros, 1994).

Los suelos asociados a las posiciones de pie de ladera muestran claras evidencias de hidrohalomorfismo (Horizontes Bn, duripanes y/o fragipanes) y taxonómicamente se clasifican como Natracuales típicos, Natracualfes típicos y Duracualfes típicos. El nivel de oscilación freático es siempre superior al crítico y su concentración salina define el grado de halomorfismo (Cisneros, 1994). En los sectores deprimidos del paisaje la génesis de suelo ocurre bajo condiciones en extremo reductoras debido a las características del drenaje interno y externo -aunque con niveles de salinidad variables- y pueden hallarse Natracualfes típicos y Duracualfes típicos (USDA, 1999).

Una descripción más detallada de estos perfiles, así como su asociación con los elementos del paisaje y con los ecogrupos de vegetación, se presentará al momento de caracterizar a los sitios de trabajo específicos.

4.3.2.6 Patrón de uso de la tierra

El uso de la tierra está claramente definido y condicionado por los aspectos biofísicos anteriormente descritos y por los socio-económicos que caracterizan a la sub-región. Entre estos últimos, cabe destacar el grado extremo de heterogeneidad en el régimen de tenencia de la tierra, siendo posible encontrar unidades de producción inferiores a 100 ha y otras aún superiores a 20.000 ha. Explotaciones de entre 1.000 y 5.000 ha son frecuentes en las zonas de grandes lagunas, y normalmente presentan esquemas de producción mixtos con tendencia a la ganadería, predominando las actividades de cría y recría de bovinos sobre la de invernada (Cisneros, 1994).

El principal recurso forrajero sobre el cual se asienta la producción animal es la vegetación natural, aunque la implantación de paraderas permanentes monoespecíficas (pasto llorón, alfalfa y agropiro alargado) o multiespecíficas (alfalfa, trébol rojo, trébol blanco, lotus, cebadilla, ray grass y pasto ovillo) en las áreas con mejor drenaje también es observada en la sub-región. El nivel tecnológico de la producción ganadera es en general bajo, siendo frecuente el pastoreo continuo, lo cual condiciona en muchos casos la composición florística del pastizal, integrado casi exclusivamente por especies de

baja preferencia animal. En períodos de anegamiento, la compactación de suelos es elevada, condicionando la germinación de propágulos de especies nativas y no así de las exóticas, que adquieren de esta forma dominancia en ciertos stands (Cisneros, 1994).

Una técnica de manejo empleada con frecuencia en la sub-región son los incendios controlados, a fin de favorecer la activación del rebrote de las especies perennes. Sin embargo, cuando se la aplica en épocas desfavorables, se elimina la cobertura vegetal en momentos en que el balance hídrico favorece el ascenso de sales por capilaridad, incrementando la **salinización superficial**. Este tipo de disturbio, surnado a los efectos del mal manejo del pastoreo, se manifiesta mediante la ocurrencia de parches sin vegetación (peladales) los cuales, al estar conectados a la freática, exhiben habitualmente costras salinas superficiales (Cisneros, 1994).

La actividad agrícola en la sub-región se desarrolla en las posiciones más elevadas del paisaje, donde la probabilidad de inundación es muy baja y el nivel de oscilación de la freática se encuentra por debajo del mínimo considerado crítico (Wosten & van Genutchen, 1988). Puede ser considerada como una zona de rendimientos marginales para los principales cultivos pampeanos (Soja, Maíz, Trigo) y con cierta potencialidad para el cultivo de Girasol en determinados años. El nivel tecnológico empleado es relativamente bajo y la actividad en la mayoría de los casos es llevada adelante por terceros ("contratistas" o "arrendatarios"), en especial en establecimientos de grandes extensiones. Este sistema de producción condiciona la rentabilidad por unidad de área y de insumo empleado en las actividades agrícolas, por cuanto las mismas distan notablemente de ser conservacionistas o sustentables en términos físicos. Este tipo de desajuste ha incrementado el riesgo de deterioro de las tierras por salinización (Cisneros, 1994).

4.3.3 Llanuras medanosas

Bajo el nombre de sub-región Llanuras medanosas se incluye a una vasta región internamente heterogénea, que abarca 1.800.000 ha con límites establecidos arbitrariamente de acuerdo a la disponibilidad de sitios de muestreo que satisfagan el diseño de los gradientes biofísicos, que representen al patrón de uso de la tierra zonal, y que conserven situaciones de nula o baja alteración del ecosistema. Comprende al cuadrante sudoeste de la provincia de Córdoba y al sector centro-este de la provincia de

San Luis. Se desarrolla latitudinalmente entre los 33° 30' y 35° S, y longitudinalmente entre 64° y 66° O, aproximadamente. En la provincia de Córdoba abarca a los departamentos de Río Cuarto (su extremo sur) y General Roca. En la provincia de San Luis abarca los departamentos de General Pedernera y el extremo norte de Gobernador Vicente Dupuy.

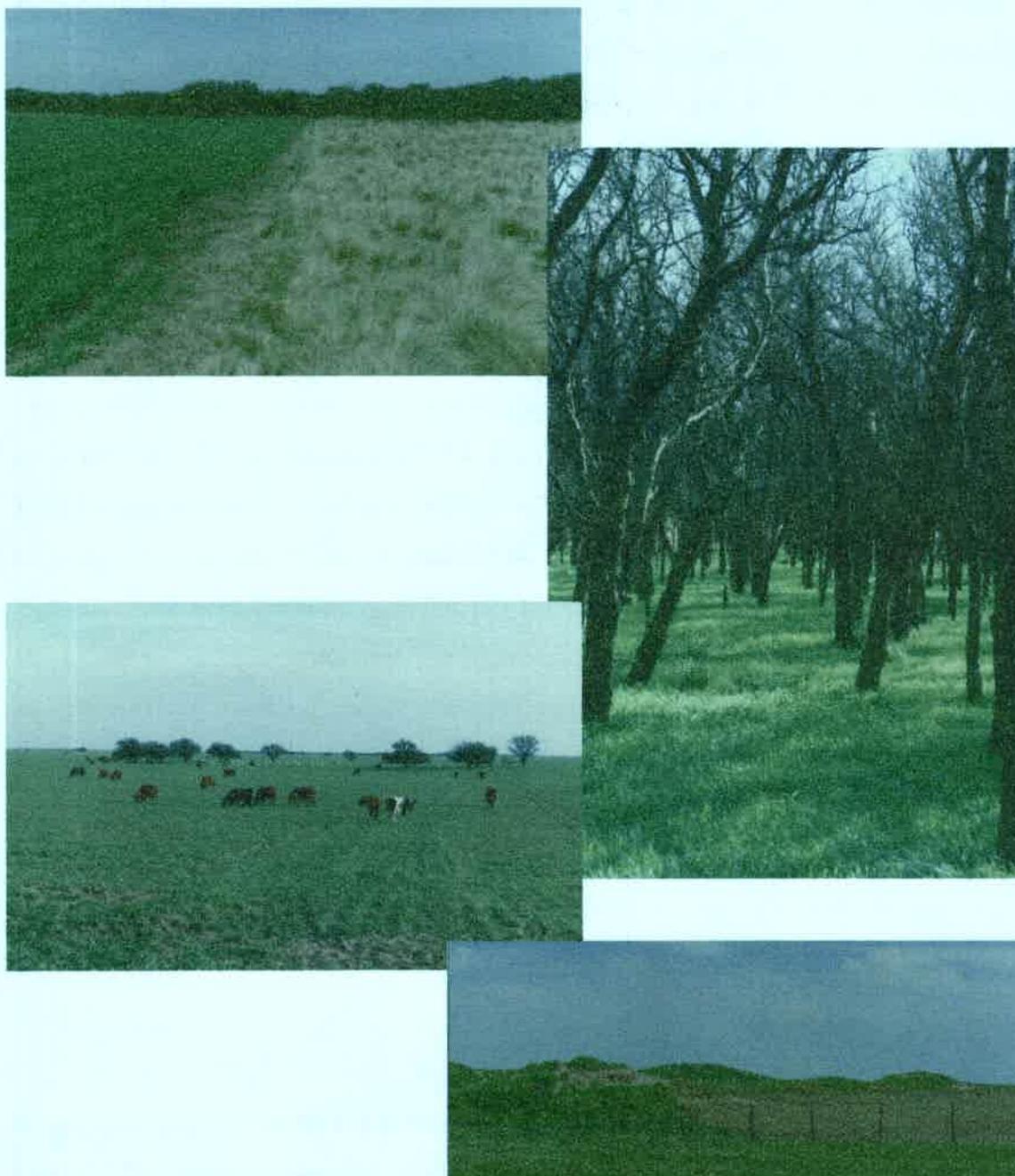


Imagen 4.7: Llanura medanosa sector noreste: (arriba) Verdeo de centeno, pastizal natural y monte de chañar; (centro) Aspecto de un monte de chañar durante el invierno; (abajo izq.) Engorde de ganado sobre verdeos anuales; (abajo der.) Cordones medanosos no estabilizados. Fotografías tomadas en un establecimiento ubicado en Colonia Sarmiento, próximo a la localidad de Vicuña Mackenna.



Imagen 4.8: Llanura medanosa sectores sur y oeste: (arriba) Aspecto general del sector medanoso con lagunas permanentes. Imágenes del Caldenal bajo fuerte presión antrópica: (centro) Extracción de ejemplares dominantes y uso pastoril extensivo, (abajo) uso pastoril con alta carga animal. Fotografías tomadas a lo largo de una franja entre localidades de Villa Mercedes al N y Buena Esperanza al S (provincia de San Luis).

La ruta nacional n° 35 constituye aproximadamente el límite este de la sub-región mientras que la ruta nacional n° 7 entre Vicuña Mackenna y Villa Mercedes estaría limitando al norte, aunque los alrededores de esta última ciudad hacia el norte (Coronel Alsogaray) y la zona al sur de la localidad de Chaján, fueron igualmente incluidos. El límite sur lo constituyen arbitrariamente las rutas provinciales n° 12 en San Luis (Buena Esperanza) y n° 26 en Córdoba (Villa Huidobro), aunque estas condiciones

agroecológicas se prolongan hacia el sector norte de la provincia de La Pampa. Hacia el oeste el límite está representado en forma bastante aproximada por la isohieta de los 500 mm, con lo que se incluye a una franja de unos 20 a 30 km de ancho hacia el oeste de la ruta nacional n° 148.

Se caracteriza por presentar un relieve general muy suavemente ondulado, aunque localmente se observa una sobre imposición de formas medanosas de distinta edad ecológica. Es un medio de alta fragilidad ecológica, donde el proceso dominante es la erosión eólica, con deflación areal y localizada en algunas dunas, favorecido por la alta susceptibilidad a la erosión que presenta la región. En forma subordinada se dan procesos de desborde y sedimentación asociados a los arroyos. No obstante, esta vasta sub-región será subdividida de acuerdo a aspectos biofísicos y socio-económicos, siguiendo los criterios de estudios previos realizados en el área (Anderson *et al.*, 1970; Peña Zubiarte *et al.*, 1980; Cantero *et al.*, 1986, 1998a).

4.3.3.1 Gradientes geológicos y geomorfológicos

El paisaje se presenta como una extensa planicie medanosa, con relieves normales suavemente ondulados, muy suavemente ondulados, e incluso planos tendidos en ciertas áreas, o fuertemente ondulados en otras. Se observan pendientes cortas con gradientes de hasta 12 %, así como pendientes muy largas con gradientes de entre 0,3 y 3 %. La presencia de médanos de diferentes edades y magnitudes, vivos o fijados, naturales o antrópicos, definen a los diferentes sectores de esta sub-región. La superficie ocupada por médanos es muy variable, pudiéndose estimar para el total del área entre un 10 a un 15 %, aunque no uniformemente distribuidos. Se reconocen dos generaciones de médanos: los más antiguos son longitudinales y constituyen la base medanosa, y los posteriores -de un amplio rango de edades- presentan formas parabólicas o pseudoparabólicas. En el Anexo II.2 se describen las diferentes formaciones medanosas que se observan en la sub-región.

La procedencia de los materiales arenosos que dieron origen a estos paisajes es tema de discusión, aunque existen elementos que indicarían su procedencia de las llanuras aluviales desérticas del sudoeste (sistema Desaguadero-Salado) y parcialmente de los depósitos aluviales del río Quinto (Cantú y Degiovanni, 1984). Hacia el sur de la sub-región, aunque principalmente fuera de sus límites, se desarrollan planicies

loésicas muy calcáreas con sedimentos francos a franco-limosos pardo-oscuros del terciario. Este sedimento, redepositado y entremezclado con otros actuales de textura arenosa, constituye el material originario de los suelos desarrollados sobre áreas planas a ligeramente deprimidas hacia el extremo sudoeste de la sub-región (INTA, 1998b).

Consecuentemente, en la sub-región se reconocen diferentes paisajes. En la provincia de Córdoba, en la asociación geomorfológica “Llanura medanosa del río Quinto” (Cantú y Degiovanni, 1984 – Figura II.1 del Anexo), se distinguen las *Llanuras bien drenadas medanosas*, que se prolongan hacia el oeste a la provincia de San Luis, y las *Llanuras bien drenadas con afloramientos de tosca*, asociadas al cauce del río Quinto y a los sedimentos loessoides del extremo sur (Llanura loésica de Arizona, INTA, 1998b). En la Provincia de San Luis, desde la margen izquierda del río Quinto hacia el norte, se reconoce a la *Llanura arenosa en parte loésica* (de Justo Daract, INTA, 1998b), hacia el oeste de Villa Mercedes a la *Llanura arenosa ligeramente ondulada*, y hacia el sur y oeste de los límites de la sub-región a la *Llanura medanosa con lagunas permanentes* (Peña Zubiate, comunicación personal).

4.3.3.2 Aspectos climáticos

El clima de la sub-región se halla dentro de los templados con características de continentalidad marcada, ya que posee amplitudes térmicas medias superiores a 16 °C y extremas -diferencia entre máxima y mínima absoluta- del orden de los 50 °C. La media varía en toda la extensión de la sub-región aunque puede considerarse bastante homogénea en este aspecto, en torno a los 16 °C, con un gradiente ligeramente negativo de norte a sur. Las temperaturas mínima y máxima medias son de 6,7 y 24 °C para la localidad de Buena Esperanza, de 7,9 y 24,7 °C para Villa Mercedes y de 8,8 y 25,8 °C para Vicuña Mackenna, respectivamente. Las heladas son de regular intensidad comenzando en término medio a principios de mayo y extendiéndose hasta fines de septiembre (INTA, 1998a, b).

La humedad relativa es bastante baja -62 % en promedio- mientras que el valor anual de nubosidad es de 50 días, siendo una de las zonas del país con mayor número de días con cielo claro. Las precipitaciones disminuyen de este a oeste, y se concentran principalmente en verano (40 %) con inviernos secos (7 %). La magnitud de las

precipitaciones es normalmente baja, aunque la ocurrencia esporádica de lluvias de 50 mm puede resultar perjudicial de acuerdo al estado de cobertura del suelo.

La precipitación media anual es de 489 mm en Buena Esperanza, 664 mm en Villa Mercedes (período 1961 – 1990, aunque registros medidos entre 1901 y 1920 arrojan un promedio de 531 mm) y de 815 mm para Vicuña Mackenna (sólo 5 años de datos 1994 - 1999, durante el ciclo húmedo) y menores a 600 en Villa Huidobro (Tabla II.1 del Anexo II.3). El balance hídrico en prácticamente toda la sub-región (suelos de baja capacidad de retención hídrica) muestra deficiencias de agua de diferente magnitud durante todo el año, naturalmente mayores en época estival (Figura II.5 del Anexo II.3).

La ausencia generalizada de estaciones meteorológicas en esta sub-región ha dificultado la obtención de información y datos fehacientes, por lo que en muchos casos se recurrió a interpolaciones lineales.

4.3.3.3 Hidrología

4.3.3.3.1 Ríos y arroyos

Los principales cursos de agua de la región son Arroyo La Guardia-Juan Jorba, Arroyo Chaján, que artificialmente es conducido hasta las proximidades de la Laguna Oscura, el Arroyo Ají que antrópicamente atraviesa el área hasta unirse con el canal La Cautiva. Más al sur el río Quinto genera una faja aluvial de moderada envergadura hasta los Bañados de La Amarga (Cantero *et al.*, 1998a).

4.3.3.3.2 Lagunas

Por lo general ocupan las cubetas de deflación de los médanos, que al llegar a la freática se transforman en lagunas con carácter de permanentes. Se ha contabilizado 132 lagunas ocupando 6.600 ha. No tienen conexión entre ellas, por lo que constituyen verdaderos sistemas cerrados. La tipología de aguas de las lagunas es variable dependiendo fundamentalmente de la composición de las aguas freáticas, la mayoría de las grandes lagunas tienen diverso grado de salinidad y composición geoquímica entre bicarbonatadas sódicas a sulfatadas sódicas, y solamente son de aguas no salinas las alimentadas por aguas de lluvias, sin conexión con las freáticas (Cantero *et al.*, 1998a).

4.3.3.4 Las formaciones vegetales

La sub-región pertenece en su mayor parte a lo que diversos autores denominan “Distrito Psamofítico” de la provincia fitogeográfica del Espinal (Cabrera, 1976; Luti *et al.*, 1979), mientras que para otros pertenecería a la provincia fitogeográfica Pampeana (Perodi, 1964; Ragonese, 1967; León y Anderson, 1983). La vegetación natural predominante en la sub-región presenta el aspecto de una estepa gramínea con isletas de chañar (*Geoffroea decorticans*), ocupando generalmente estas últimas los casquetes de los médanos (Bianco *et al.*, 1987). En las cubetas intermédanos la vegetación varía sensiblemente respecto a la de los sitios adyacentes, siendo comunes los cortaderales (*Cortaderia selloana*), los juncales (*Juncus acutus*) y los pastizales halófilos de pelo de chancho (*Distichlis spicata*). Para más detalles sobre la composición vegetal de este distrito, ver Anexo II.4.

Otras formaciones vegetales encontradas en la sub-región, aunque en forma menos extendida, son el Bosque de caldén (provincia fitogeográfica del Espinal, “distrito del caldén”, Cabrera, 1976) y el ecotono entre el “Bosque de quebracho blanco y algarrobo” por un lado y el “Bosque de caldén” por el otro (Anderson, *et al.*, 1970).

El primero de ellos aparece asociado a suelos franco arenosos, de pH ácido hacia el oeste de la sub-región (Orquín *et al.*, 1985) y en suelos con acumulaciones de calcáreo en el perfil o con afloramientos de tosca (Bianco *et al.*, 1987) hacia el sur y en la zona de influencia del río Quinto. Fisonómicamente se trata de un bosque abierto con árboles de 8 a 12 m de altura, con una distribución espacial de la vegetación que responde a dos hábitats característicos: el umbrófilo, determinado por la proyección vertical de las copas del caldén, algarrobo (*Prosopis flexuosa*), chañar, tala, con especies herbáceas adaptadas al mismo, tales como el pasto puna (*Stipa brachichaeta*), la paja blanca, la paja vizcachera, la cola de zorro (*Setaria leiantha* y *S. leucophila*) y el palque (*Cestrum parqui*); el ambiente heliófilo, correspondiente a las abras de monte, es ocupado por la flechilla negra, la gramilla (*Cynodon hirsutus*), la flechilla de invierno (*Stipa tenuis*), el unquillo, la poa, el pasto plateado (*Digitaria californica*), entre otras. Otras especies arbóreas asociadas son el peje y el molle (*Schinus fasciculatus*), mientras que los principales arbustos son el piquillín de las víboras, el atamisque (*Atamisquea emarginata*), y el piquillín (*Condalia microphylla*).

El ecotono mencionado abarca el área noroeste de la sub-región, hacia el norte del río Quinto, siendo éste el límite austral de la distribución del quebracho blanco (*Aspidosperma quebracho-blanco*). El bosque es más bien bajo y abierto compuesto principalmente por las siguientes especies leñosas: caldén, algarrobo negro, peje, tala, alpataco, chañar, molle, abreboca (*Maytenus spinosa*), jarilla (*Larrea divaricata*), piquillín, etc. En el estrato herbáceo se agregan especies como la saetilla, la cebadilla pampeana (*Bromus brevis*), la pata de gallo (*Chloris ciliata*) el pasto pujante (*Diplachne dubia*) y el penacho blanco (*Bothriochloa barbinodis*) (Orquin *et al.*, 1985).

4.3.3.5 Tipos de suelo en la sub-región

Los gradientes climáticos y granulométricos de los materiales originarios de suelo presentan una dirección aproximadamente noreste - sudoeste dentro de la sub-región, de allí que la intensidad de los factores formadores así como la capacidad de los sedimentos determinan un gradiente en igual sentido para el grado de desarrollo de los perfiles de suelo, con las lógicas excepciones encontradas en ambientes particulares, tales como las márgenes de cauces de agua, las zonas perilacunares, los médanos activos, etc. Hacia el oeste de la sub-región, casi sobre su límite, se ubica la línea divisoria entre los regímenes hídricos del suelo ústico y arídico (van Wambeke y Scoppa, 1976).

En general, en toda la sub-región se desarrollan suelos poco evolucionados. Hacia el norte y el este, es posible encontrar Haplustoles énticos y en algunos casos típicos (Cantero *et al.*, 1986), mientras que hacia el oeste y sur comienzan a predominar los Ustipsamientos típicos, los cuales aparecen asociados a Ustortentes típicos e incluso Torripsamientos típicos y ústicos hacia el oeste (Peña Zubiata *et al.*, 1980; INTA, 1998a, b). Los suelos asociados al cauce del río Quinto son Haplustoles énticos con afloramientos de tosca (Cantero *et al.*, 1986). La formación vegetal "Estepa graminosa con isletas de chañar" aparece asociada a suelos arenosos, con predominancia de arenas finas, pH ligeramente ácido y bajos niveles de materia orgánica (0,7 - 0,9 %). La formación "Bosque de caldén" aparece asociada a suelos arenosos a franco arenosos con buen contenido de materia orgánica debajo de los caldenes (hasta 4 %) y menor en las abras (0,7 a 1,3 %), y en la zona de influencia del río Quinto algo de calcáreo pulverulento en el perfil y planchas de tosca endurecidas en el horizonte C. Los suelos

de toda la subregión presentan baja capacidad de retención hídrica, drenaje interno excesivo y riesgo de erosión eólica.

4.3.3.6 Patrón principal de uso de la tierra

La principal actividad de la sub-región es la ganadería bovina extensiva, aunque el incremento de las precipitaciones durante los últimos años ha provocado el avance de la frontera agrícola hacia el oeste. Grandes extensiones del bosque de caldén han sido taladas con este fin. Históricamente el suelo es cultivado en forma esporádica durante ciclos hídricos favorables, para luego ser abandonado frente a las épocas de sequía. La actividad ganadera en general ha llevado en muchos casos a la sobreexplotación del recurso natural forrajero, encontrándose con frecuencia potreros totalmente invadidos por la paja de las vizcacheras (*Stipa eriostachya*). La región sudoeste, principalmente en la Provincia de San Luis, contaba hacia el año 1906 con más de 400.000 ha de alfalfa, favorecida por la escasa profundidad de la freática en ese entonces, pero debido a la sequía de 1916 y a la acción de otros factores desapareció casi totalmente. Posteriormente fueron reimplantadas pero las sequías de 1937 y 1951 terminaron nuevamente con los alfalfares y ya nunca se logró el mismo nivel, siendo su aporte a la dieta animal reemplazado por verdeos (centeno, sorgo y maíz) y posteriormente pasto llorón. Algunas superficies ocupadas por alfalfa fueron abandonadas y repobladas por especies nativas, en algunos casos invadió el chañar y otros se convirtieron en médanos vivos (Orquín *et al.*, 1985).

Las planicies entre médanos se caracterizan por la presencia de suelos arenosos, desarrollando dunas disipadas, con drenaje excesivo. El reemplazo de la vegetación



Imagen 4.9
Desmante de un "Caldenal" en Villa Sarmiento

natural por cultivos, ha desencadenado un severo proceso de pérdida de tierras por erosión eólica. En el extremo sur existen suelos de escasa profundidad por la presencia de tosca, lo que, asociado a la tala indiscriminada del

bosque de caldén, incrementa aún más los riesgos de pérdida de este recurso (Imagen 4.9). En el extremo suroeste existen aproximadamente 80.000 ha de bosques de caldén, con un grado variable de degradación por acción de diferentes tipos de desmante al que

están siendo sometidos. Los pastizales naturales, sufren degradación por fuego y pastoreo y una reducción creciente de la superficie que ocupan por la competencia con malezas exóticas, incorporadas a través de los cultivos (Ejemplo: alcanfor, *Heterotheca latifolia*).

Los cultivos estivales más frecuentes son el girasol, el sorgo granífero y el maíz. El centeno se destaca como cultivo invernal, con el propósito de su pastoreo directo por el ganado. El pasto llorón, sembrado en franjas o en cultivos puros, reviste el doble propósito de fijación de médanos y control de la erosión, así como su aporte a la dieta del ganado. En la actualidad, es notable el incremento de la superficie dedicada al cultivo del maní en el noreste de la sub-región, debido a la necesidad de nuevas tierras que afronta este sector productivo, luego de que las enfermedades de suelo han proliferado en la zona tradicional de cultivo (Sub-región Llanuras bien drenadas).

La actividad ganadera principal es la cría bovina con tendencia a la recría y casos aislados de invernada, hacia el sudoeste, mientras que esta última actividad aumenta en intensidad hacia el noreste. La capacidad de carga animal varía ampliamente de acuerdo a la composición florística natural o sub-espontánea, producto del sobre-uso del recurso o del cultivo esporádico de las tierras. Hacia el sudoeste, donde reside el perfil más extensivo de la sub-región, una condición de pastizal buena con gramíneas perennes de alta preferencia animal puede soportar cargas de hasta 5 ha/UG (Unidades Ganaderas), mientras que la vegetación de los chañarales y de los malezales están frecuentemente por debajo de 15 ha/UG (INTA, 1998a, b). La posibilidad de recuperar y mejorar los pastizales es notable, y se realiza mediante la planificación de las épocas apropiadas de descanso, a fin de favorecer especialmente a las especies invernales (poas, flechillas, etc.) de buen valor forrajero. El empleo de verdeos invernales y estivales, así como la implantación de pasto llorón, resultan fundamentales en los esquemas productivos de la sub-región. El palque (*Cestrum parqui*) es una especie tóxica para el ganado muy común en hábitats umbrófilos de los potreros más degradados y en las banquinas de los caminos vecinales. La paja de las vizcacheras es una invasora muy agresiva en condiciones pobres de pastizal, transformándose con facilidad en dominante. Se la controla con fuego, aunque con resultados variables y no siempre duraderos.

Muchas de las lagunas de la sub-región -cubetas de erosión con afloramiento de la freática- tienen agua apta para el consumo ganadero, con algunas limitaciones por elevadas cantidades de arsénico y flúor (Cantero *et al.*, 1998a). Otras, en cambio, no

pueden utilizarse para tal fin por presentar concentraciones salinas muy elevadas. Las aguas de laguna presentan mayor concentración salina que las extraídas de molinos. El problema de calidad de aguas se agrava hacia el sudoeste de la sub-región, en especial hacia el sur del río Quinto. En esta unidad se incluyen las dunas parabólicas cuyo funcionamiento tiene una dinámica asociada a los ciclos climáticos: en los períodos secos tienden a activarse y a avanzar sobre las planicies; en los ciclos húmedos a cubrirse de vegetación y estabilizarse. El uso inadecuado de los pastizales en los médanos estabilizados ha renovado su dinámica erosiva. En resumen los médanos son verdaderos focos de desertificación.

4.3.4 Área serrana y pedemontana

Esta sub-región pertenece a la provincia geomorfológica “Sierras Pampeanas” (ver Figura II.1 del Anexo) e incluye el sector sur del sistema serrano de Ccomechingones y los sistemas de Los Cóndores y Las Peñas (Cantú y Degiovanni, 1984). Abarca una superficie cercana a las 300.000 ha e incluye la parte occidental de los departamentos de Río Cuarto y Calamuchita, y tiene una altitud aproximada de 2.000 msnm al norte de la sub-región considerada (Localidad Río de los Sauces), y de 950 msnm al sur (entre las localidades de Achiras y La Punilla). Su desarrollo este-oeste se reduce consecuentemente hacia el sur, siendo de 40 y 10 km de ancho en las situaciones mencionadas, respectivamente. El área pedemontana, con una superficie aproximada de 84.000 ha, constituye una estrecha faja de 3 a 5 km de ancho que bordea al cordón serrano hacia el este (Cantero *et al.*, 1998a).

4.3.4.1 Geología y geomorfología

El estilo tectónico de este sector de las sierras pampeanas está caracterizado por la presencia de mega-estructuras de rumbo aproximadamente meridional que delimitan bloques basculados con escarpa abrupta hacia el oeste y pendiente suave tendida al este, cuyo desarrollo inicial corresponde a los períodos Precámbrico y Paleozoico (Gordillo y Lencinas, 1970). Asociadas a estas grandes fallas se observan estructuras de menor magnitud que controlan rasgos menores tales como la disposición de la red de drenaje (Cantú y Degiovanni, 1984).

La litología ejerce un control importante en la evolución de los rasgos geomorfológicos. Se reconoce en la sub-región un basamento integrado por rocas metamórficas (gneiss, esquistos, migmatitas, anfibolitas, mármoles, etc.) y por rocas ígneas preferentemente de composición granítica. También se reconocen algunos cuerpos ultrabásicos muy localizados (Cantú y Degiovanni, 1984).



Imagen 4.10: (arriba) Aspecto general de las formaciones vegetales de altura con componente leñoso. Actividades productivas en el pedemonte: (centro) Ganadería en el sector austral; (abajo) Agricultura en el sector oriental.

El sistema presenta una asimetría geomorfológica bien marcada entre las laderas este y oeste, y una estructura en bloques con diferente desplazamiento en sentido vertical e inclinación. Como consecuencia del ascenso y estructuración de las sierras actuales, sólo se observan vestigios de una antigua superficie de erosión (peniplanicie) cuyos relictos constituyen actualmente las denominadas pampas de altura (Cantú y Degiovanni, 1984). Este patrón de paisaje caracterizado por una antigua peniplanicie cristalina (gneiss) con intrusiones graníticas es bastante uniforme en toda la sub-región (Gordillo y Lencinas, 1970).

En general, el área presenta un relieve abrupto y complejo, con pendientes de longitud variable y gradientes de hasta el 45 %, y constituye el área de nacientes de varios cursos de sur de Córdoba. El paisaje se compone de quebradas con fuertes pendientes, cursos angostos y encajonados, valles interconectados sin relleno sedimentario, con ollas y rápidos a nivel del cauce, y pampas de altura. Estas últimas son planicies suavemente onduladas con pendientes entre 1 y 2 %. Generalmente, estas superficies conservan una espesa cobertura loésica producto de la intensa meteorización de las rocas ígneas y metamórficas. En los valles o en áreas con leves procesos de erosión hídrica se pueden observar suelos de gran desarrollo, algunos con características vérticas, que no se corresponderían a los climas actuales (Cantú, 1998).

En los interfluvios afloran rocas de basamento sobre las que se desarrollaron suelos someros, pedregosos, que no superan los 10 cm de profundidad y dominan los procesos de remoción en masa y erosión fluvial. Hacia el borde oriental y sur de las Sierras se observa un área de relieve suavizado que presenta valles con relleno sedimentario de origen coluvial y aluvial, bajas pendientes, suelos profundos, bien desarrollados, con alto contenido de materia orgánica y alta disponibilidad hídrica por su ubicación en el relieve.

El pedemonte está representado por depósitos aluviales y coluviales que afloran en una estrecha faja mientras que la mayor parte del área está ocupada por mantos loésicos arenosos muy finos a limosos del Pleistoceno superior y Holoceno. Se trata de conos aluviales coalescentes con distinta cobertura eólica, pendientes cortas y medias de 3 a más de 15 % (Cantú y Degiovanni, 1984). Para una descripción más detallada de las sub-unidades que componen esta región, ver Anexo II.2.4.

4.3.4.2 Aspectos climáticos

El clima de la región es húmedo con veranos cortos y frescos e inviernos secos, vientos frecuentes y gran amplitud térmica. El régimen de precipitaciones es de tipo monzónico, con un período lluvioso de seis meses (primavera - verano) que concentra alrededor del 80 % de las lluvias, alternando con un período seco (otoño - invierno) durante el cual ocurren algunas precipitaciones en forma de nieve. Las precipitaciones aumentan con la altitud (ver Tabla II.1 del Anexo II), variando la media anual entre 860 mm en las partes más bajas (700 msnm) hasta 1.100 mm en los sectores más elevados (1.400 msnm), donde se registran datos meteorológicos.

La temperatura media anual es de 12,7 °C a 1.400 msnm, aunque durante los meses más cálidos (diciembre - enero) la máxima absoluta alcanza los 31 °C, mientras que durante los más fríos (junio - julio) la mínima absoluta es de -10 °C. Las heladas comienzan en mayo - junio y terminan en agosto - septiembre (González, 1999). El balance hidrológico (Figuras II.6 y II.7 del Anexo II) muestra seis meses con déficit hídrico aunque no en forma continua (entre mayo y julio, entre septiembre y octubre y levemente en diciembre) y, de acuerdo a la clasificación climática de Thornthwaite y Mather (1967) el clima de la sub-región es de tipo sub-húmedo.

4.3.4.3 Hidrología

La densidad de drenaje es alta y los procesos dominantes son de erosión vertical en los cursos de agua, procesos de remoción en masa (caídas y deslizamientos de bloques) en laderas escarpadas, y erosión hídrica en manto y encauzada en áreas con cobertura de sedimentos sometidas a uso principalmente ganadero (Cantero *et al.*, 1998a).

4.3.4.3 Las formaciones vegetales

Desde el punto de vista florístico el área se incluye dentro del “Parque Chaqueño” (Parodi, 1964) o del “Parque Chaqueño Serrano” (Ragonese, 1967), aunque en su máximo empobrecimiento, ya que muchas de las especies típicas del mismo no se encuentran a esta latitud, o son muy escasas (Bianco *et al.*, 1987), como el

horcoquebracho (*Schinopsis haenkeana*), el quebracho blanco (*Aspidosperma quebracho-blanco*), la tusca (*Acacia aroma*) y la manzana de campo (*Ruprechtia apetala*).

La flora del paisaje serrano está compuesta por más de 600 especies, organizadas en cuatro tipos fisonómicos definidos por un gradiente de altitud, exposición, humedad disponible y características del sustrato. Se diferencian la “Estepa gramínea de altura”, el “Arbustal”, el “Bosque serrano” y el “Monte” (Bianco *et al.*, 1987) (ver Anexo II.4). Para el primer tipo fisonómico enumerado, Cantero *et al.* (1996) estudiaron la variación composicional de la vegetación y reconocieron 388 especies organizadas en 15 comunidades vegetales, las cuales fueron reunidas a un nivel jerárquico superior en 8 ecogrupos. Tales ecogrupos –tipos de vegetación ambientalmente uniformes caracterizados por la presencia de una influencia ambiental dominante– fueron utilizados como criterio de agrupamiento de las observaciones a campo y serán presentados oportunamente junto con la caracterización de sitios de muestreo, a un mayor nivel de detalle.

El 80 % de la superficie serrana está dominada por pastizales naturales, las fisonomías arbóreas-arbustivas están restringidas a una estrecha franja en la base del paisaje serrano. Estos sistemas de vegetación presentan un nivel variable de degradación por efecto de talas, fuego y sobrepastoreo. Existen problemas importantes de pérdidas de especies vegetales del germoplasma nativo, especialmente en el grupo de plantas medicinales y aromáticas, y en menor medida en forrajeras.

En el área pedemontana la vegetación natural se ha reducido notablemente debido al desmonte y laboreo, pero responde fundamentalmente al tipo fisonómico descrito para la parte basal de las sierras: un monte con predominio de espinillo y la presencia en mayor o menor grado de isletas de chañar (*Geoffroea decorticans*), tala, moradillo, coco y algunos pocos ejemplares de algarrobo negro y blanco (*Prosopis nigra* y *alba*). Desde el punto de vista florístico constituye un ecotono entre los distritos “Chaqueño serrano” y “Chaqueño occidental” (Ragonese, 1967), con un empobrecimiento florístico notable debido al manejo y la latitud (Bianco *et al.*, 1987).

El sector norte de la sub-región es cubierto por la hoja Alpa Corral de la Carta de Suelos de la República Argentina (INTA, 1994) que define, a una escala 1:100.000, tres complejos de suelos: complejo indeterminado de sierras bajas con monte, complejo indiferenciado de series Calamuchita I, II y V, y complejo en pampa de altura, suelos loésicos y afloramientos rocosos. En el primer complejo los suelos dominantes son Hapludoles énticos de textura franca gruesa de espesor variable, siendo más profundos en paisajes suavemente colinados y someros con afloramientos rocosos en los sectores más altos y escarpados.

En el segundo complejo los suelos dominantes son Udorthents líticos de textura esquelética franca, de escaso desarrollo, someros o muy someros apoyados sobre rocas



Imagen 4.11: Suelos someros

alteradas o firmes. En los valles y bajos con pendientes entre 10 a 25 % el horizonte superficial presenta un contenido moderadamente alto de materia orgánica. El complejo de pampas de altura está ubicado por encima de los 1.500 msnm con pendientes no superiores al

10 %. Son suelos loésicos, bien desarrollados, con profundidades que superan los 80 cm, horizontes texturales, altos contenidos de materia orgánica y susceptibles de erosión hídrica.

Otros estudios realizados en la sub-región describen como principales sub-grupos de suelo Hapludoles típicos y líticos, Argiudoles típicos y líticos y Fluventes en los valles (Cantú y Cantero, 1981; Cantero *et al.*, 1981, 1986; González *et al.*, 1996). En algunos sectores se observan mallines con suelos muy orgánicos aunque tienen poca expresión areal.

Los suelos en el área pedemontana son poco desarrollados en crestas de lomas y afloramientos, con gravas y gravillas en su perfil. Existen acumulaciones eólicas localizadas de materiales franco arenosos en áreas sujetas a aportes de cursos y bajos concentradores y conductores de agua de escorrentía (Bianco *et al.*, 1987). Es común la superposición de capas de sedimentos discontinuos, en general con materiales finos y alto contenido de materia orgánica. Los principales sub-grupos de suelos (USDA, 1999)

presentes en el área son Haplustoles líticos, típicos y énticos, Argiudoles y Udifluventes típicos (Cantú y Cantero, 1981; Cantero *et al.*, 1986).

4.3.4.5 Patrón de uso de la tierra

En la sub-región predomina la ganadería de cría, especialmente de caprinos y ovinos sobre pastizales naturales, con reducidas áreas bajo cultivo, principalmente de maíz. Existe además una actividad forestal de mediana importancia basada principalmente en el cultivo de *Pinus eliottii*, *P. radiata* y *P. taeda*. Se tiene poca información sobre la producción del pastizal, por lo que resulta difícil ajustar la carga animal, la cual se estima entre 3 y 6 ha por equivalente vaca (Menghi *et al.*, 1978; Anderson *et al.*, 1980, 1981). Las quemas periódicas del pastizal a fin de mejorar su calidad aumentan la exposición del suelo a la erosión por escurrimiento (Herrera *et al.*, 1978) (Imagen 4.12).

De acuerdo a observaciones a campo (Cantero *et al.*, 1996) el ganado vacuno pasa en promedio el 36 % del tiempo pastoreando en las comunidades de pastizal alto, 47 % en pastizal bajo, y 17 % en comunidades de los denominados



Imagen 4.12: Quema intencional de un pastizal

“céspedes”. Previo a la introducción del ganado en la sub-región estos pastizales evolucionaron bajo una leve presión de pastoreo generada por los herbívoros nativos (guanaco: *Lama guanicoe*). La diversidad florística se ha visto incrementada por efecto de la introducción del ganado durante los últimos 100 años (Sala *et al.*, 1986).

El pedemonte es un área agrícola-ganadera, con pastizales naturales, praderas anuales o perennes y cultivos estivales. No se conoce la receptividad ganadera, aunque Bianco *et al.* (1987) la estiman entre 3 y 4 ha por equivalente vaca. Se presentan problemas frecuentes con plantas tóxicas para el ganado tales como *Baccharis cordifolia*, *B. artemisioides* y *Cestrum parqui* (Cantero y Bianco, 1986b).

4.3.1.1. El cultivo de la papa en el valle del Cauca

En el departamento del Cauca, el cultivo de la papa se realiza en las zonas altas y medias, en las montañas y en las sierritas que rodean a las ciudades y pueblos. El cultivo de la papa en el valle del Cauca, Colombia, se inició en el año 1950, cuando se introdujo el cultivo de la papa de la zona de la sierra de Bogotá. Desde entonces, el cultivo de la papa en el valle del Cauca ha experimentado un crecimiento constante, tanto en la producción como en el área sembrada. En el año 1980, la producción de papa en el valle del Cauca fue de 100.000 toneladas métricas, lo que representa un aumento del 100% con respecto al año 1950.



Figura 4.12: Cultivo de papa en el valle del Cauca. El cultivo de la papa en el valle del Cauca se inició en el año 1950, cuando se introdujo el cultivo de la papa de la zona de la sierra de Bogotá. Desde entonces, el cultivo de la papa en el valle del Cauca ha experimentado un crecimiento constante, tanto en la producción como en el área sembrada.

El cultivo de la papa en el valle del Cauca se realiza en las zonas altas y medias, en las montañas y en las sierritas que rodean a las ciudades y pueblos. El cultivo de la papa en el valle del Cauca, Colombia, se inició en el año 1950, cuando se introdujo el cultivo de la papa de la zona de la sierra de Bogotá. Desde entonces, el cultivo de la papa en el valle del Cauca ha experimentado un crecimiento constante, tanto en la producción como en el área sembrada.

El cultivo de la papa en el valle del Cauca se realiza en las zonas altas y medias, en las montañas y en las sierritas que rodean a las ciudades y pueblos. El cultivo de la papa en el valle del Cauca, Colombia, se inició en el año 1950, cuando se introdujo el cultivo de la papa de la zona de la sierra de Bogotá. Desde entonces, el cultivo de la papa en el valle del Cauca ha experimentado un crecimiento constante, tanto en la producción como en el área sembrada.

Capítulo 5: Aspectos metodológicos

5.1 Introducción

El presente capítulo ofrece detalles de la metodología empleada durante el desarrollo de esta tesis, sobre las fuentes de información secundaria utilizadas y sobre la generación original de resultados. Los sitios tomados para realizar las simulaciones con el modelo Century, de acuerdo a los criterios descritos en el capítulo precedente, fueron seleccionados de un gradiente de condiciones ambientales y de material originario de suelos que integran los diferentes ambientes de la región Sur de la provincia de Córdoba, desde la zona serrana y pedemonte del sistema de Comechingones, pasando por las llanuras eólicas loésicas y arenosas bien drenadas, con relieves normales a subnormales, hasta la zona de imperfecto o mal drenaje del sudeste de la provincia, y en este capítulo serán caracterizados en mayor detalle.

Se seleccionaron situaciones en las que fuera posible identificar una condición natural del paisaje, en especial de vegetación, de manera de poder realizar muestreos de suelos no alterados antrópicamente y conocer así los niveles de materia orgánica en el estado de equilibrio natural. Para cada una de estas situaciones originales se seleccionaron sectores aledaños que correspondieran a la misma génesis pero que hallan sido alteradas por uso agrícola, pastoril o mixto.

Los datos correspondientes a las variables y parámetros utilizados durante las simulaciones son presentados para cada situación analizada, así como los códigos empleados para la identificación de los sitios. A partir de tal información se realizó un análisis de los factores que controlan los niveles de C orgánico a escala regional, así como de las implicancias de los mismos sobre ciertas propiedades de los suelos. Los métodos utilizados así como los supuestos asumidos son descritos aquí del mismo modo.

Las simulaciones fueron diseñadas a fin de representar lo más adecuadamente posible el amplio rango de situaciones actuales de uso y manejo así como a su evolución histórica. Para ello, nuevamente ciertos supuestos fueron asumidos -y ciertas generalizaciones necesariamente incluidas- con el objeto de obtener resultados

comparables. Una definición de “Situaciones de uso y manejo” fue adoptada con el fin de acotar la diversidad encontrada en la región, y la misma es descrita en este capítulo.

Por último, la metodología empleada para la validación del modelo Century, para evaluar su bondad de ajuste y su utilidad es brevemente presentada (para más detalles ver Tiftonell, 2004). La sensibilidad del modelo a las diferentes variables ambientales así como a los parámetros y condiciones iniciales fue extensamente estudiada por Tiftonell (2004) de acuerdo al enfoque descrito a continuación.

5.2 Fuentes de información

5.2.1 Información climática

Las variables climáticas requeridas por el modelo consisten en valores mensuales de precipitaciones y temperatura. En el primer caso la precipitación media mensual y el desvío estándar de la misma. En el segundo, las temperaturas máximas y mínimas medias mensuales. Tales datos fueron obtenidos a partir de las Cartas de Suelos de la República Argentina, Hojas 3363-27 La Carlota (INTA, 1985), 3363-14 General Cabrera (INTA, 1986a), 3363-28 Canals (INTA, 1986b), 3363-33 General Viamonte (INTA, 1986c), 3363-34 La Cesira (INTA, 1986d), 3566 Hoja Catastral N° 6 Buena Esperanza (INTA, 1986e), 3363-8 Hernando (INTA, 1988), 3566 Hoja Catastral N° 8 Arizona (INTA, 1991), 3563-10 Cañada Seca (INTA, 1993a), 3563-11 Diego de Alvear (INTA, 1993b), 3363-20 Ucache (INTA, 1993c), 3363-21 Pascanas (INTA, 1993d), 3366-12 Río de los Sauces y 3366-18 Alpa Corral (INTA, 1994), 3363-26 Alejandro (INTA, 1998a), Carta de Suelos y Vegetación de la provincia de San Luis (INTA, 1998b), Atlas de Suelos de la provincia de Córdoba (INTA, 1990), a partir de los datos generados por la Cátedra de Climatología de la Universidad Nacional de Río Cuarto, y a través de datos presentados en publicaciones previas (Cisneros, 1994; De Prada, 1994; Bricchi, 1996; Cantú, 1998; González, 1999). Interpolaciones lineales y/o triangulaciones entre estaciones meteorológicas fueron empleadas para la generación de datos en aquellos sitios distantes o carentes de información.

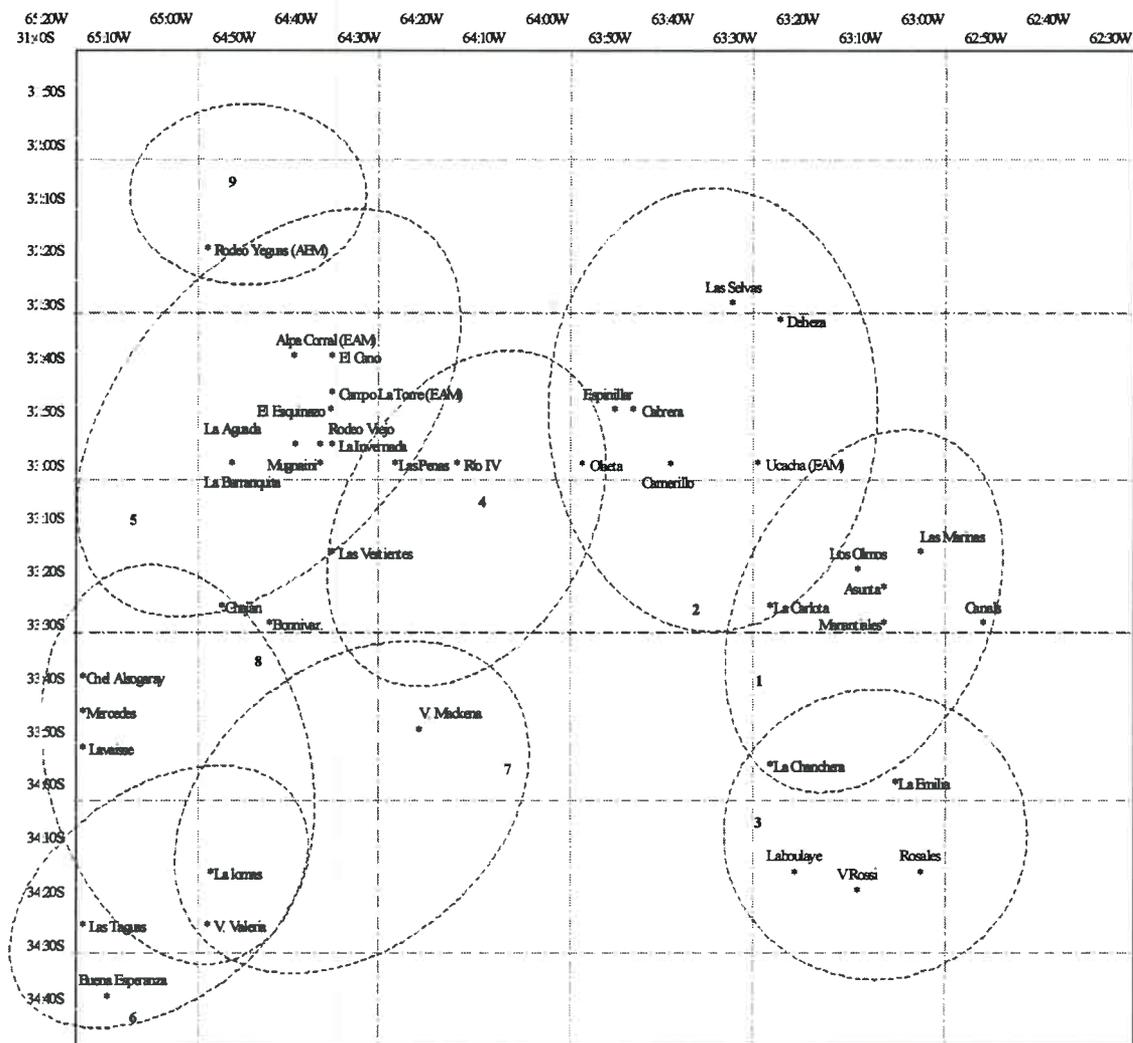


Figura 5.1: Representación esquemática de la distribución de las observaciones y de las estaciones meteorológicas (y su zona de influencia) en el área de trabajo. El esquema carece de valor cartográfico y sólo indica tales distribuciones en un plano de coordenadas. 1: La Carlota; 2: Deheza cuenca media; 3: Laboulaye; 4: Río Cuarto; 5: Conjunto complejo de estaciones (La Aguada, Los Chañares, Campo La Torre, Comechingones, etc.); 6: Buena Esperanza; 7: Vicuña Mackenna; 8: Villa Mercedes; 9: Rodeo de Yeguas.

La Figura 5.1 muestra una representación esquemática de la distribución geográfica de los sitios estudiados y de la ubicación de las estaciones meteorológicas, en un plano de coordenadas. La mayor variabilidad y, por lo tanto, la mayor densidad de puntos de observación, ocurre en las proximidades del cordón serrano y en su zona de influencia oriental (pedemonte y llanuras bien drenadas onduladas). En sectores geomorfológicamente más homogéneos, como la zona de influencia de la localidad de

General Cabrera, la representatividad de las observaciones meteorológicas comprende mayores extensiones.

La simplicidad que ofrece el modelo Century en el requerimiento de información climática fue, sin embargo, difícil de afrontar en muchas de las situaciones estudiadas. Una importante variabilidad surgió del empleo de series climáticas provenientes de diversas fuentes, discontinuas, o generadas durante períodos cortos en los que, en ocasiones, sólo un ciclo climático anormal es registrado.

5.2.2 Variables edáficas

La textura, profundidad y densidad aparente del horizonte superficial son las principales variables requeridas por el modelo para las simulaciones de largo plazo (por ej. más de 10 - 20 años) o para la estimación de los niveles de C en condiciones de equilibrio, por cuanto fueron los principales criterios de agrupamiento para los puntos de muestreo. El contenido de C orgánico en el horizonte superficial (0,2 m) es el principal resultado sobre el que se evaluó la representatividad de las simulaciones. Esta serie de datos mínimos fue obtenida a partir de publicaciones o trabajos previos y/o generados a partir de muestreos en los sitios seleccionados.

Información disponible sobre propiedades edáficas (por ej. densidad aparente, porosidad) y sobre aspectos cuali-cuantitativos de las fracciones orgánicas fue utilizada para el análisis de los factores que controlan los niveles de C en el suelo y de su influencia sobre la dinámica edáfica.

5.2.2.1 Información disponible

Una extensa cantidad de información sobre los datos mencionados fue obtenida a partir de los trabajos de zonificación y relevamiento de suelos realizados por la Universidad Nacional de Río Cuarto (Becerra *et al.*, 1981, 1983; Bonadeo y Bricchi, 1983, 1991; Bricchi, 1995, 1996; Bricchi *et al.*, 1991, 1999, 2004; Cantero *et al.*, 1981, 1983, 1986, 1987a, b, 1999; Cantero y Cantú, 1985; Cantú y Cantero, 1981; Cisneros, 1994; Cisneros *et al.*, 1999a, b, c, 2000; Gil *et al.*, 1983a, b; González *et al.*, 1983, 1996; Hampp *et al.*, 1983; Uberto *et al.*, 2001, Valero *et al.*, 1984, etc.). Información sobre textura del horizonte superficial en buena parte de los sitios seleccionados fue

obtenida a partir de las Cartas de Suelos de la República Argentina (*op. cit.*). Del mismo modo, publicaciones de otros diversos autores que condujeron trabajos de relevamiento en la región (por ej. Jarsún, 1979; Anderson, 1981) fueron consultadas para la obtención de datos.

5.2.2.2 Generación de información

El criterio para la selección de los sitios fue explicado en el capítulo precedente (Sección 4.1). En aquellos sitios para los cuales no se contaba con información suficiente o la misma resultaba poco representativa, se realizaron muestreos y mediciones a campo para su determinación analítica.

Tabla 5.1: Datos correspondientes a un establecimiento ubicado 30 km al NW de la localidad de General Cabrera, perteneciente a la sub-región de las Llanuras Bien Drenadas. Los valores corresponden a un Haplustol típico (arcilla: 11,3%; limo: 33,3%; arena: 55,5%) bajo tres situaciones de uso y manejo.

Situación de uso y manejo	Código de Sitio	Profundidad		Densidad aparente (g cm ⁻³)	Materia orgánica (%)
		sólum (m)	epipedón (m)		
Ambiente úmbrico bajo monte de Chafar y Espinillo, en pastoreo	<i>Fbm</i>	0,78	0,18	1,10	6,00
Pastizal natural en los claros y abras del monte, en pastoreo	<i>Fam</i>	0,46	0,21	1,10	3,21
Lote agrícola sistematizado y cultivado en franjas (rastroy de soja)	<i>Fa</i>	0,78	0,18	1,35	2,55

En un sector representativo de cada ambiente de los sitios seleccionados se cavó una calicata y se determinó la profundidad total del perfil y de cada uno de los horizontes diferenciados. Se identificaron las principales propiedades edáficas en términos de



color, textura, estructura, consistencia, profundidad de raíces y presencia de elementos

diagnósticos relevantes (por ej. tosca, sales, barnices, moteados y/o concreciones de hierro y manganeso, etc.).

Diferentes puntos de muestro fueron seleccionados, incluyendo a las situaciones de uso y manejo implementadas dentro del área de distribución de cada tipo de suelo caracterizado. Un ejemplo de tal procedimiento es presentado en la Tabla 5.1, donde figuran los datos obtenidos en un establecimiento ubicado en las proximidades de General Cabrera. El mismo elemento suelo fue identificado bajo una vegetación de monte natural (Imagen 5.2), bajo pastizal natural (abra de monte) y bajo rotación agrícola en un lote sistematizado (Imagen 5.1) y cultivado en franjas (Imagen 4.1). La coexistencia de distintas situaciones de uso en un mismo suelo y próximas entre sí representa un aporte de información muy valiosa.

La densidad aparente y el contenido hídrico fueron medidos en los primeros 0,25



Imagen 5.2: Vegetación natural

m del perfil a intervalos de 0,05 m, mediante el empleo de una sonda de rayos gamma (Humboldt Scientific Inc. 1986). Se

caracterizó la evolución vertical de la densidad aparente y se obtuvo un promedio ponderado para los primeros 0,2 m del horizonte superficial, con el cual se corrió el modelo. Estas mediciones se realizaron en cada una de las situaciones identificadas.

Se tomó una muestra de suelo, de aproximadamente 1 kg, a partir de cada uno de los horizontes identificados en la calicata. De ésta, así como de todas las situaciones identificadas para el mismo elemento suelo, se tomó una muestra del horizonte superficial de aproximadamente 0,5 kg para la determinación del contenido de C. En el caso de situaciones bajo monte o pastizal natural, se diferenciaron las capas superficiales del resto del epipedón, debido a la acumulación de residuos vegetales en vías de descomposición en los primeros centímetros del perfil.

Las muestras fueron manualmente desagregadas y ubicadas en bandejas a fin de facilitar el secado. Las muestras secas al aire fueron tamizadas con tamiz de malla de 500 μ . Se tomó una sub-muestra de la fracción tamizada para la determinación del contenido de humedad mediante secado en estufa a 30 °C hasta peso constante. El contenido de humedad se calculó como la diferencia de peso antes y después del secado.

El contenido de C orgánico en la muestra tamizada fue determinado mediante la oxidación con una mezcla de dicromato de potasio y ácido sulfúrico, y posterior valoración del exceso del primero con sulfato ferroso amónico (Walkley & Black, 1976). El valor obtenido a partir del análisis (g C kg^{-1} de suelo) fue expresado en porcentaje de materia orgánica (1,724 x g C en 100 g de suelo), a fin de presentar los resultados con mayor claridad. Sin embargo, para la comparación de los valores observados y los simulados por el modelo, el valor obtenido mediante el análisis de laboratorio fue expresado en g de C por m^2 de suelo, para los 0,2 m iniciales del perfil, de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\text{Contenido de C [g m}^{-2}] = \text{g C en 100 g suelo} * 0,2 \text{ m}^3 / \delta_{ap} [\text{kg m}^{-3}] * FC [\text{g kg}^{-1}]$$

Donde,

δ_{ap} : densidad aparente expresada en kg m^{-3} , ponderada para los primeros 0,2 m del perfil,

FC: factor de corrección de unidades: 10 g kg^{-1} , que surge de convertir el contenido de C de gramos por 100 g de suelo en gramos por kilogramo de suelo.

Debido a que el criterio inicial para la selección de los sitios fue la identificación de unidades paisaje-suelo a partir de material cartográfico, los sub-grupos taxonómicos de suelo identificados a campo fueron correlacionados con la información disponible sobre la distribución de las series de suelo en cada sub-región de acuerdo a relevamientos previos (por ej. Jarsún, 1979; Cantero *et al.*, 1986; Cartas de Suelos de la República Argentina (*op. cit.*)). Esto permitió asignar la textura, previamente determinada, correspondiente a los suelos de cada sitio relevado. La sensibilidad del modelo a variaciones porcentuales en el contenido de arena, limo y arcilla fue, no obstante, evaluada por Tittonell (2004) a fin de estimar el error relativo derivado de tal metodología.

5.2.3 Tipos de vegetación

El tipo de vegetación interviene en la definición de cantidad y calidad de residuos orgánicos que son mensualmente adicionados al suelo (ver Capítulo 3 – Los sub-modelos de producción de biomasa). El modelo Century presenta una serie de sub-rutinas que contienen un importante número de parámetros para cada tipo de vegetación. La Tabla I.3 del Anexo presenta ejemplos de un número de parámetros correspondientes a un pastizal templado, con predominio de gramíneas C3. Tales parámetros, 70 en total para pastizales, son definidos en la etapa de *parametrización* del modelo.

La generación de parámetros de vegetación es una tarea que escapa a los objetivos de esta tesis. La modificación de tales archivos debe ser realizada en coordinación con los autores del modelo, bajo su autorización y supervisión (Parton *et al.*, 1992). No obstante, diferentes conjuntos de parámetros se encuentran disponibles para los principales tipos de vegetación existentes, desde pastizales templados, tropicales, semi-desérticos, sabanas húmedas o semi-áridas, bosques de latifoliadas, coníferas y hasta vegetación de tipo tundra.

Las unidades de vegetación dominantes en cada una de las sub-regiones fueron descritas en el capítulo anterior de acuerdo a los relevamientos realizados por diversos autores (Cabrera, 1976; Cantero y Bianco, 1986a, b; Cantero *et al.*, 1988b, c, 1998a, b, c; Bianco *et al.*, 1987; Cantero, 1993). En cada uno de los sitios seleccionados se determinó el tipo de vegetación dominante (presente actualmente o bajo condiciones iniciales) y, de acuerdo a ello, se seleccionó el conjunto de parámetros disponible para el diseño de las simulaciones (ver Diseño de las simulaciones).

5.2.4 Historia de uso y manejo

La historia de uso y manejo de los agroecosistemas permite generar los esquemas de manejo que son utilizados por el Century para la estimación de los flujos de C dentro y a través del sistema. Ligados al C, los flujos de N, P y S son igualmente simulados. Estos flujos son ampliamente determinados por la magnitud de las adiciones y remociones de materia resultantes de las actividades agrícola-ganaderas. En tal sentido, su correcta definición resulta clave en el diseño de las simulaciones.

Una reseña de las principales actividades productivas imperantes en cada sub-región fue presentada en el capítulo precedente. Esta información, conjuntamente con la aportada por los productores durante el relevamiento a campo y con la publicada por diversos autores (Mansilla, 1944; Parodi, 1966; Ragonese, 1967; D' Andrea y Nores, 1977, 1996a, 1996b; Capitanelli, 1979; Jarsún, 1979; Barrionuevo, 1986; Holguín de Roza, 1986; Barcenás, 1992; De Prada, 1994; Cantero *et al.*, 1998; Cisneros *et al.*, 2004; Cisneros *et al.*, 2008) fue utilizada para reconstruir la historia al definir las "Situaciones de uso y manejo" (ver Diseño de las simulaciones). Las mismas representan situaciones promedio, que intentan acotar la gran variabilidad existente. Tittonell (2004) hace un profundo análisis de los factores que controlan la génesis de la fracción orgánica y su evolución bajo historias de uso de largo plazo.

5.3 Caracterización de los sitios

5.3.1 Atributos del paisaje

Debido a la disponibilidad de información, a su importancia productiva, y a la necesidad de acotar el número de variables en juego, la mayoría de los sitios seleccionados corresponde a situaciones zonales. No obstante, y especialmente en los casos en que la información fue generada a partir de relevamientos a campo durante el desarrollo de este estudio, diferentes puntos de observación a lo largo de una toposecuencia representativa fueron incluidos, intentando representar a los diferentes elementos del paisaje.

La definición de toposecuencias para la selección de los puntos de observación fue, sin embargo, adoptada en todos los sitios para la definición de condiciones de zonalidad. En aquellos ambientes en los que la relación paisaje-suelo se manifiesta con mayor integridad, y en los que la amplia heterogeneidad geomorfológica determina variaciones micro-ambientales que afectan definitivamente los factores que controlan los niveles de C en el suelo, las condiciones de intrazonalidad fueron incluidas.

Esta metodología fue adoptada con mayor frecuencia en las sub-regiones llanuras mal drenadas, llanuras medanosas y en los ambientes serranos. La Figura 5.2 ilustra la definición de un perfil topográfico modal para las condiciones del sitio Las Taguas, en la provincia de San Luis, perteneciente a la *Llanura medanosa con lagunas*

permanentes. Los sitios de muestreo fueron seleccionados a fin de incluir los elementos del paisaje más representativos.

Perfil topográfico modal

- 1- Laguna asociada a médanos
- 2- Médanos poco estabilizados
- 3- Lomas convexas de médanos antiguos, pendientes del 1 al 2%
- 4- Planicies intermedanasas, pendientes del 0,5 al 1%
- 5- Médanos estabilizados, áreas de "bordes y bajos", pendientes del 2 al 3 %.

↑ Sitios de muestreo

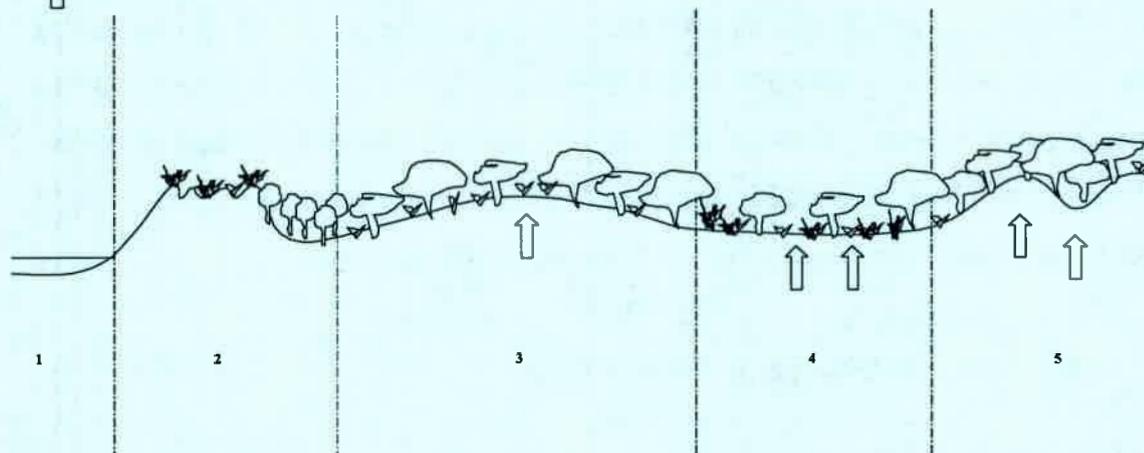


Figura 5.2: Perfil topográfico modal levantado a mano alzada, correspondiente al sitio Las Taguas, provincia de San Luis, sub-región llanuras medanosas. Las flechas indican los puntos de observación. El esquema representa la distribución y cobertura del monte de caldén (*Prosopis caldenia*) originario, y la coexistencia de estepas gramíneas en las "abras" del monte.

Una sinopsis de la posición en el paisaje de los sitios seleccionados para las sub-regiones Llanuras bien drenadas, medanosas y mal drenadas es presentada en las Tablas 5.2 a 5.4, sólo para las situaciones de baja alteración antrópica (las situaciones antropizadas son variantes de éstas, presentando la misma ubicación en el paisaje). En las mismas se define el tipo de vegetación original correspondiente, así como el uso actual predominante, la clase natural de drenaje y la ubicación geográfica de los mismos. Los ambientes serranos (Tabla 5.9) fueron discriminados sobre la base de su ubicación en el paisaje, de manera que este tipo de información resultaría redundante.

Los códigos de sitio fueron asignados para facilitar su identificación en la presentación de los resultados de las simulaciones y son mantenidos en las secciones subsecuentes. Tales códigos se componen generalmente de las iniciales correspondientes a la denominación del sitio o de la localidad de importancia más cercana, seguidos de las letras minúsculas *m* [monte], *p* [pastizal] o *a* [agrícola], u otros, y/o un número que permite diferenciar dos o más situaciones que presentan características similares. De esta forma, el código *LSm* de la Tabla 5.2, hace referencia a

una situación bajo monte natural perteneciente al establecimiento “La Selva”, mientras que aquellas situaciones en las que se observa actualmente agricultura se denominan *LSa*. Tal diferenciación no fue adoptada de manera estricta, ya que no fue necesaria en aquellas sub-regiones en las que sólo se observan pastizales, como en las llanuras mal drenadas.

Tabla 5.2: Caracterización de los sitios seleccionados con situaciones de alteración antrópica leve a moderada para la sub-región Llanuras bien drenadas.

Sitio	Código	Ambiente	Drenaje	Vegetación tipo		Ubicación geográfica
				original	actual	
<i>Llanuras bien drenadas con relieve suavemente ondulado</i>						
UNRC	<i>Unb</i>	Lomas	bd	Monte	Agrícola	33:07 / 64:18
Isleta	<i>Isl</i>	Lomas planas	mbd	Monte	Monte	33:07 / 64:18
Las Vertientes	<i>LV</i>	Lomas	bd	Pastizal	Pastizal	n/d
<i>Llanuras bien drenadas con relieve fuertemente ondulado</i>						
La Aguada	<i>LAl</i>	Lomas	bd	Monte	Pastizal	32:55 / 64:43
	<i>LAb</i>	Bajos	mbd	Monte	Pastizal	32:55 / 64:43
	<i>Mug</i>	Lomas planas	bd	Pastizal	Agrícola	33:01 / 64:41
	<i>LAm</i>	Lomas	bd	Monte	Monte	32:55 / 64:43
La Barranquita	<i>LBm</i>	Lomas	aed	Monte	Monte	n/d
	<i>LBam</i>	Lomas	aed	Pastizal	Pastizal	n/d
Bonnivardo	<i>Bom1</i>	Lomas medianosas	ed	Monte	Monte	n/d
	<i>Bom2</i>	Lomas medianosas	ed	Monte	Monte	n/d
El Esquinazo	<i>Esl</i>	Lomas pedemontanas	bd	Monte	Monte	n/d
	<i>Esm</i>	Laderas pedemontanas	aed	Monte	Monte	n/d
	<i>Esb</i>	Bajos cumúlicos	bd	Monte	Monte	n/d
<i>Llanuras bien drenadas con relieve subnormal</i>						
La Selva	<i>LSm</i>	Lomas planas	bd	Monte	Monte	32:44 / 63:43
	<i>LSa</i>	Lomas planas	bd	Monte	Agrícola	32:44 / 63:43
Franza	<i>Frp</i>	Lomas planas	bd	Pastizal	Pastizal	32:49 / 63:51
	<i>Fbm</i>	Lomas planas	bd	Monte	Monte	32:49 / 63:51
El Espinillar	<i>Esm</i>	Lomas arenosas	aed	Monte	Monte	33:01 / 63:56
Santa María	<i>SMP</i>	Lomas planas	bd	Monte	Pastizal	32:40 / 63:36

Drenaje: (bd) bien drenado; (mbd) moderadamente bien drenado; (aed) algo excesivamente drenado; (ed) excesivamente drenado; (id) imperfectamente drenado; (md) mal drenado. n/d: No disponible – no determinada.

Tabla 5.3: Caracterización de los sitios seleccionados con situaciones de alteración antrópica leve a moderada para la sub-región Llanuras medanosas.

Sitio	Código	Ambiente	Drenaje	Vegetación tipo		Ubicación geográfica
				original	actual	
Las Lomas	Vam	Planicies medanosas	aed	Monte	Monte	34:25 / 64:55
Sarmiento	<i>Mkm</i>	Planicies intermedanosas	aed	Monte	Monte	n/d
	<i>Mkp</i>	Planicies intermedanosas	aed	Pastizal	Pastizal	n/d
Lavaisse	<i>Lvm</i>	Planicies intermedanosas	ed	Monte	Monte	33:49 / 65:16
Rodrigo	<i>Roc1</i>	Pie de loma medanosa	aed	Monte	Monte	33:44 / 65:23
Bogino	<i>Bgm1</i>	Lomas arenosas	ed	Monte	Monte	33:20 / 65:02
Las Taguas	<i>LTm1</i>	Planicies intermedanosas	ed	Monte	Monte	34:39 / 65:18
	<i>LTm2</i>	Hoyas medanosas	ed	Monte	Monte	34:39 / 65:18
	<i>LTm3</i>	Lomas medanosas	ed	Monte	Monte	34:39 / 65:18

Tabla 5.4: Caracterización de los sitios seleccionados con situaciones de alteración antrópica leve a moderada para la sub-región Llanuras mal drenadas.

Sitio	Código	Ambiente	Drenaje	Vegetación tipo		Ubicación geográfica
				original	actual	
<i>Áreas positivas, lomas arenosas convexas</i>						
Assunta	<i>As1</i>	Lomas arenosas	aed	Pastizal	Pastizal	33:35 / 63:05
El Cruce	<i>EC1</i>	Lomas arenosas	aed	Pastizal	Pastizal	33:40 / 63:15
Los Tamariscos	<i>LT1</i>	Lomas convexas	bd	Pastizal	Pastizal	33:58 / 63:22
La Chanchera	<i>Ch1</i>	Albardones antiguos	bd	Pastizal	Pastizal	33:55 / 63:20
<i>Tendidos débilmente inclinados o a nivel</i>						
El Cruce	<i>EC2</i>	Laderas subnormales	mbd	Pastizal	Pastizal	33:40 / 63:15
	<i>EC3</i>	Planicies subnormales	id	Pastizal	Pastizal	33:40 / 63:15
Los Tamariscos	<i>LT2</i>	Tendidos fluviales	mbd	Pastizal	Pastizal	33:58 / 63:22
La Chanchera	<i>Ch2</i>	Tendidos fluviales	mbd	Pastizal	Pastizal	33:55 / 63:20
	<i>Ch4</i>	Bajos semicóncavos	id a md	Pastizal	Pastizal	33:55 / 63:20
	<i>Ch8</i>	Planicies aluviales y eólicas	id	Pastizal	Pastizal	33:55 / 63:20
<i>Áreas negativas, planicies subnormales – cóncavas</i>						
Los Tamariscos	<i>LT3</i>	Bajos cóncavos	md	Pastizal	Pastizal	33:58 / 63:22
La Chanchera	<i>Ch3</i>	Planos bajos subnormales	md	Pastizal	Pastizal	33:55 / 63:20

5.3.2 Variables edáficas

La adquisición de datos de suelo fue desarrollada precedentemente en este capítulo. Aquí se presentan, en las Tablas 5.5 a 5.9, los datos que finalmente fueron

utilizados para el diseño de las simulaciones. El modelo Century presenta los resultados de sus simulaciones para los 20 cm superficiales del suelo, por tal razón, en la comparación observado vs. simulado de aquellos suelos con epipedón de diferente profundidad, el valor de materia orgánica fue recalculado de manera de hacerlos comparables. En todas ellas aparecen la clasificación taxonómica de suelos y, en el caso de las llanuras medanosas (Tablas 5.7a y 5.7b), la unidad geomorfológica a la que pertenece cada sitio dentro de la sub-región. Los datos empleados para el diseño de las simulaciones corresponden sólo al horizonte superficial. El modelo Century, en su última versión, permite generar simulaciones que involucran a la totalidad de los horizontes y toma en cuenta los flujos sub-superficiales, en especial para los sub-modelos de N, P y S. Para la simulación de la dinámica del C, el efecto de la inclusión de horizontes inferiores no fue evaluado debido a la carencia de un volumen crítico de datos.

5.3.3 Variables climáticas

Los datos climáticos utilizados en el diseño de las simulaciones son presentados en el Anexo II.3, así como las respectivas fuentes y los métodos empleados para generarlos en los casos de ausencia de registros. Las Figuras 5.3 a 5.6 ilustran la distribución de las precipitaciones y de la temperatura media en estaciones representativas de las diferentes sub-regiones. En tales histogramas resulta claramente evidente la distribución estival de las precipitaciones en todas las sub-regiones bajo estudio.

Tabla 5.5: Principales características edáficas de los sitios seleccionados para las llanuras bien drenadas con relieve subnormal. Los símbolos utilizados se corresponden con los de las tablas previas.

Sitio	Código	Clasificación Taxonómica	Profundidad		Textura			Densidad Aparente (g cm ⁻³)	Materia Orgánica (%)
			Sólum (m)	Epipedón (m)	arena (%)	limo (%)	arcilla (%)		
<i>Situaciones con alteración antrópica leve a muy leve</i>									
La Selva	<i>LSm</i>	Haplustol típico	0,78	0,18	48,1	39,4	12,5	1,11	5,76
Franza	<i>Fam</i>	Haplustol típico	0,46	0,21	55,5	33,3	11,3	1,10	2,45
	<i>Fbm</i>	Haplustol típico	0,78	0,18	55,5	33,3	11,3	1,10	6,00
El Espinillar	<i>Esp</i>	Haplustol údico	0,72	0,28	68,1	22,7	9,2	1,20	4,52
Santa María	<i>SM</i>	Haplustol údico	0,77	0,26	53,8	34,6	11,6	1,29	3,38
<i>Situaciones con alteración antrópica media a severa</i>									
La Selva	<i>LSa1</i>	Haplustol típico	0,78	0,18	48,1	39,4	12,5	1,30	1,72
	<i>LSa2</i>	Haplustol típico	0,78	0,18	42,9	45,0	12,1	1,30	2,28
	<i>LSa3</i>	Haplustol típico	0,78	0,21	43,3	43,7	13,0	1,27	2,05
Franza	<i>Fa</i>	Haplustol típico	0,78	0,18	55,5	33,3	11,3	1,35	2,55
AEGD	<i>Dex</i>	Haplustol típico	0,82	0,20	48,5	39,0	12,5	1,35	1,27
El Espinillar	<i>Espa</i>	Haplustol éntico	0,65	0,16	68,1	22,7	9,2	1,36	1,04
Carnerillo	<i>Car</i>	Haplustol éntico	0,74	0,19	72,5	20,6	6,9	1,25	1,45
Charras	<i>Chr</i>	Haplustol éntico	0,51	0,26	72,5	18,5	9,0	1,41	1,08
La Florida	<i>LF1</i>	Haplustol típico	0,63	0,22	43,3	43,7	13,0	1,26	2,13
Santa Eufemia	<i>SE1</i>	Haplustol típico	0,59	0,23	42,4	46,3	11,3	1,29	2,32
	<i>SE2</i>	Haplustol típico	0,61	0,20	36,0	48,6	15,4	1,32	2,52
Grosso	<i>Gro</i>	Haplustol típico	0,64	0,17	36,1	48,2	15,7	1,30	2,15
Cabrera	<i>Ces</i>	Haplustol éntico	0,50	0,21	50,2	39,2	10,6	1,32	1,37
Olaeta	<i>Ocs</i>	Haplustol éntico	0,53	0,26	68,2	22,4	9,4	1,34	1,62
Deheza	<i>Des</i>	Haplustol típico	0,77	0,22	36,0	48,3	15,7	1,30	1,81

Tabla 5.6a: Principales características de los suelos en los sitios seleccionados para las llanuras bien drenadas con relieve ondulado. Situaciones bajo degradación antrópica leve.

Sitio	Código	Clasificación Taxonómica	Profundidad		Textura			Densidad	Materia
			Sólum (m)	Epipedón (m)	arena (%)	limo (%)	arcilla (%)	Aparente (g cm ⁻³)	Orgánica (%)
UNRC	<i>Unb</i>	Hapludol típico	0,80	0,28	52,3	34,2	13,5	1,15	3,12
Isleta	<i>Isl</i>	Hapludol thapto petrocálcico	0,66	0,36	36,4	45,9	17,8	1,14	3,45
Las Vertientes	<i>LV</i>	Haplustol údico	0,81	0,18	53,3	33,8	13,0	1,12	5,03
La Barranquita	<i>LBm</i>	Hapludol éntico	0,66	0,25	77,0	15,0	8,0	1,12	3,20
	<i>Bam</i>	Hapludol éntico	0,65	0,22	77,0	15,0	8,0	1,16	4,10
La Aguada	<i>LAl</i>	Hapludol típico	0,80	0,19	56,8	32,5	10,7	1,30	2,17
	<i>LAB</i>	Hapludol típico	0,90	0,17	36,7	43,6	19,7	1,19	4,90
	<i>Mug</i>	Hapludol típico	1,10	0,19	31,3	46,4	22,3	1,25	5,52
	<i>LAm</i>	Hapludol típico	0,90	0,20	26,5	51,9	21,6	1,22	7,00
El Esquinazo	<i>Esl</i>	Hapludol típico/lítico	0,65	0,25	60,3	29,7	10,0	1,31	3,35
	<i>Esm</i>	Hapludol lítico	0,25	0,18	71,8	17,2	11,0	1,30	3,51
	<i>Esb</i>	Hapludol típico/cumúlico	1,52	0,28	47,7	40,8	11,5	1,40	7,76
Bonnivardo	<i>Bom1</i>	Ustortent típico	0,57	0,18	79,0	16,3	4,7	1,16	1,70
	<i>Bom2</i>	Haplustol éntico	0,69	0,19	80,6	13,1	6,3	1,19	2,11

Tabla 5.6b: Principales características de los suelos en los sitios seleccionados para las llanuras bien drenadas con relieve ondulado. Situaciones bajo degradación antrópica media a severa.

Sitio	Código	Clasificación Taxonómica	Profundidad		Textura			Densidad Aparente (g cm ⁻³)	Materia Orgánica (%)
			Sólum (m)	Epipedón (m)	arena (%)	limo (%)	arcilla (%)		
UNRC	<i>Una</i>	Hapludol típico	0,80	0,25	52,3	34,2	13,5	1,44	1,19
Campus	<i>Cam</i>	Hapludol típico	0,76	0,19	53,5	33,6	13,0	1,49	1,14
La Barranquita	<i>LB1</i>	Hapludol éntico	0,70	0,23	76,8	15,0	8,2	1,54	1,92
	<i>LB2</i>	Hapludol éntico	0,68	0,20	77,0	15,0	8,0	1,40	1,52
	<i>LB3</i>	Hapludol éntico	0,70	0,25	76,8	15,0	8,2	1,32	1,20
La Aguada	<i>Lacs</i>	Hapludol éntico	0,40	0,17	47,7	40,8	11,5	1,30	1,02
	<i>Latc</i>	Hapludol éntico	0,73	0,38	71,8	17,2	11,0	1,31	1,47
Speranzonni	<i>Spi</i>	Hapludol típico	1,10	0,20	31,3	46,4	22,3	1,33	3,60
La Invernada	<i>LIn</i>	Hapludol típico	0,51	0,22	41,4	48,5	10,1	1,30	2,80
Rodeo Viejo	<i>RV1</i>	Hapludol típico	0,65	0,20	71,7	17,3	11,0	1,30	2,71
	<i>RV2</i>	Hapludol típico	0,63	0,28	72,1	16,7	11,2	1,28	2,67
	<i>RVcs</i>	Haplustol éntico	0,44	0,20	44,5	43,8	10,4	1,36	1,40
Bonnivardo	<i>Bop2</i>	Haplustol éntico	0,81	0,20	77,7	16,3	6,0	1,34	0,86
	<i>Bom3</i>	Ustortent típico	0,58	0,18	83,7	10,9	5,3	1,31	0,59
Chaján	<i>Cha1</i>	Haplustol éntico	0,72	0,23	76,5	17,2	6,3	1,32	1,20
	<i>Cha2</i>	Ustortent típico	0,52	0,15	80,4	15,3	4,3	1,32	0,50
Suco	<i>Sua</i>	Haplustol típico	1,00	0,26	80,0	13,1	6,9	1,29	1,01

Tabla 5.7a: Principales características edáficas de los sitios seleccionados para las llanuras medanosas. Situaciones bajo alteración antrópica leve a muy leve.

Sitio	Código	Clasificación Taxonómica	Profundidad		Textura			Densidad	Materia	Unidad
			Sólum (m)	Epipedón (m)	arena (%)	limo (%)	arcilla (%)	Aparente (g cm ⁻³)	Orgánica (%)	
Las Lomas	<i>Vam</i>	Haplustol éntico	0,48	0,18	78,1	16,2	5,7	1,23	4,68	1
Sarmiento	<i>Mkm</i>	Ustortent típico	0,44	0,22	78,7	15,4	5,9	1,23	4,38	1
	<i>Mkp</i>	Ustortent típico	0,45	0,20	78,7	15,4	5,9	1,23	1,74	1
Lavaisse	<i>Lvm</i>	Ustipsament típico	0,51	0,20	82,5	12,4	5,1	1,20	8,17	2
Rodrigo	<i>Roc1</i>	Ustortent típico	0,66	0,15	68,5	21,3	10,2	1,15	5,37	3
Bogino	<i>Bgm1</i>	Ustipsament típico	0,39	0,15	89,3	6,4	4,4	1,21	2,10	4
Las Taguas	<i>LTm1</i>	Ustipsament típico	0,48	0,24	82,5	12,4	5,1	1,30	2,76	5
	<i>LTm2</i>	Torripsament ústico	0,47	0,27	89,2	6,2	4,6	1,24	3,44	5
	<i>LTm3</i>	Torripsament ústico	0,48	0,07	91,3	6,1	2,6	1,23	2,57	5

Unidad: Código que indica la unidad fisiográfica a la que pertenece el sitio; (1): Llanura medanosa, (2): Llanura medanosa con médanos antrópicos, (3): Planicie arenosa ondulada (no medanosa), (4): Llanura arenosa no medanosa (en parte loéssica) y (5): Llanura medanosa con lagunas permanentes.

Tabla 5.7b: Principales características edáficas de los sitios seleccionados para las llanuras medanosas. Situaciones bajo alteración antrópica media a severa.

Sitio	Código	Clasificación Taxonómica	Profundidad		Textura			Densidad	Materia	Unidad
			Sólum (m)	Epipedón (m)	arena (%)	limo (%)	arcilla (%)	Aparente (g cm ⁻³)	Orgánica (%)	
Las Lomas	<i>Vap</i>	Haplustol éntico	0,50	0,20	78,1	16,2	5,7	1,32	1,21	1
	<i>Var1</i>	Haplustol éntico	0,55	0,25	78,1	16,2	5,7	1,47	0,97	1
	<i>Var2</i>	Ustipsament típico	0,48	0,13	79,7	14,9	5,4	1,30	1,04	1
Sarmiento	<i>Mka1</i>	Ustortent típico	0,48	0,19	78,7	15,4	5,9	1,36	1,01	1
	<i>Mka2</i>	Ustortent típico	0,41	0,20	78,7	15,4	5,9	1,24	0,99	1
Lavaisse	<i>Lvp</i>	Ustipsament típico	0,49	0,16	82,5	12,4	5,1	1,35	0,97	2
Rodrigo	<i>Rom2</i>	Ustortent típico calcáreo	0,60	0,22	66,5	27,0	6,5	1,31	1,65	3
	<i>Rom3</i>	Ustortent típico calcáreo	0,34	0,10	66,5	27,0	6,5	1,33	1,02	3
	<i>Roc2</i>	Ustortent típico	0,44	0,10	68,5	21,3	10,2	1,28	2,50	3
	<i>Roc3</i>	Ustortent típico	0,45	0,28	68,5	21,3	10,2	1,28	5,24	3
Bogino	<i>Bgp1</i>	Ustipsament típico	0,38	0,18	89,3	6,4	4,4	1,36	1,04	4
	<i>Bgp2</i>	Ustipsament típico	0,47	0,17	89,3	6,4	4,4	1,38	1,03	4
Las Taguas	<i>LTP1</i>	Ustipsament típico	0,52	0,15	80,4	14,2	5,4	1,42	0,78	5
	<i>LTP2</i>	Ustipsament típico	0,52	0,28	80,4	14,2	5,4	1,32	0,94	5
	<i>LTA1</i>	Torrripsament ústico	0,48	0,17	85,7	9,2	5,1	1,46	0,83	5
	<i>LTA2</i>	Ustipsament típico	0,48	0,24	82,5	12,4	5,1	1,30	0,95	5
Buena Esperanza	<i>Becs</i>	Ustipsament típico	0,45	0,20	79,7	14,9	5,4	1,35	0,90	5

Unidad: Código que indica la unidad fisiográfica a la que pertenece el sitio; (1): Llanura medanosa, (2): Llanura medanosa con médanos antrópicos, (3): Planicie arenosa ondulada (no medanosa), (4): Llanura arenosa no medanosa (en parte loésica) y (5): Llanura medanosa con lagunas permanentes.

Tabla 5.7c: Principales características edáficas de los sitios seleccionados para las llanuras medanosas. Situaciones bajo alteración antrópica muy severa.

Sitio	Código	Clasificación Taxonómica	Profundidad		Textura			Densidad	Materia
			Sólum (m)	Epipedón (m)	arena (%)	limo (%)	arcilla (%)	Aparente (g cm ⁻³)	Orgánica (%)
Del Campillo	<i>DCa</i>	Ustortent típico	0,46	0,20	75,4	16,2	8,4	1,35	0,97
Don Guillermo	<i>DGa</i>	Ustortent típico	0,40	0,22	81,4	13,9	4,7	1,40	1,52
El Cristiano I	<i>ECri1a</i>	Ustortent típico	0,42	0,21	82,9	12,5	4,6	1,40	1,19
El Cristiano II	<i>ECri2a</i>	Haplustol éntico	0,65	0,20	59,6	30,2	10,2	1,30	2,05
El Sarmiento	<i>ESa</i>	Haplustol éntico	0,38	0,14	48,8	38,5	12,7	1,25	2,05
El Veintitrés	<i>EVa</i>	Haplustol éntico	0,45	0,17	64,8	25,2	10,0	1,30	1,45
El Yarará	<i>EYa</i>	Haplustol éntico	0,43	0,18	74,2	17,0	8,8	1,35	1,54
Huinca Renancó	<i>HRa</i>	Ustortent típico	0,43	0,21	76,6	16,5	6,9	1,35	1,26
La Argentina	<i>LArga</i>	Argiacuol típico	0,93	0,26	59,6	30,4	10,0	1,30	1,90
La Beatriz	<i>LBza</i>	Natralbol típico	0,65	0,19	69,4	22,7	7,9	1,35	1,21
La Renancó	<i>LRa</i>	Natracualf típico	0,86	0,15	69,5	23,5	7,0	1,40	1,27
La Pelita	<i>LPa</i>	Natralbol típico	0,67	0,18	53,9	33,8	12,3	1,25	1,23
Los Portefños	<i>LPa</i>	Natralbol típico	0,82	0,19	43,5	43,6	12,9	1,20	2,11
San Carlos	<i>SCa</i>	Argialbol típico	1,00	0,18	67,5	23,9	8,6	1,35	1,23
San Félix	<i>SFa</i>	Natracualf típico	0,97	0,22	58,9	32,0	9,1	1,35	1,02
San Juan	<i>SJa</i>	Argiacualf típico	0,72	0,13	69,5	21,9	8,6	1,35	0,89

Tabla 5.8: Principales características edáficas de los sitios seleccionados para las llanuras mal drenadas (situaciones con alteración por pastoreo).

Sitio	Código	Clasificación Taxonómica	Profundidad		Textura			Densidad	Materia	Grado de alteración antrópica
			Sólum (m)	Epipedón (m)	arena (%)	limo (%)	arcilla (%)	Aparente (g cm ⁻³)	Orgánica (%)	
<i>Áreas positivas, lomas arenosas convexas</i>										
Assunta	As1	Haplustol éntico	1,00	0,30	71,5	12,3	16,2	1,29	1,23	medio
El Cruce	EC1	Haplustol éntico	0,95	0,26	71,4	11,2	17,3	1,27	1,99	leve
Los Tamariscos	LT1	Haplustol éntico	0,74	0,21	70,1	15,0	14,9	1,32	2,35	medio
La Chanchera	LCh1	Haplustol típico	0,88	0,27	70,4	14,2	15,6	1,28	2,27	medio
<i>Tendidos débilmente inclinados o a nivel</i>										
Assunta	As2	Haplustol éntico thapto nátrico	1,15	0,24	70,5	18,5	11,0	1,30	1,27	medio
	As3	Haplacul típico	1,10	0,22	61,2	23,6	15,2	1,42	1,57	medio a severo
El Cruce	EC2	Haplustol thapto nátrico	0,81	0,20	70,2	18,6	11,2	1,29	1,81	leve a medio
	EC3	Haplacul thapto frágico	0,62	0,18	61,1	24,5	14,3	1,37	2,41	medio
Los Tamariscos	LT2	Duracualf típico	0,45	0,19	44,1	39,1	16,8	1,10	4,52	leve
La Chanchera	LCh2	Haplacul thapto frágico	0,73	0,19	59,5	27,7	12,9	1,28	2,09	medio
	LCh4	Duracualf típico	0,40	0,21	43,9	40,0	16,1	1,07	2,27	medio
	LCh5	Natracualf típico	0,52	0,25	29,8	42,5	27,7	1,10	1,58	medio
	LCh7	Duracualf típico	0,79	0,15	50,7	31,9	17,5	1,27	1,84	medio
	LCh8	Haplacul thapto frágico	0,80	0,28	49,1	32,0	18,9	1,38	2,09	medio a severo
<i>Áreas negativas, planicies subnormales - cóncavas</i>										
Assunta	As4	Natracualf típico	0,38	0,19	49,7	29,6	20,8	1,19	1,64	medio
Los Tamariscos	LT3	Natracualf típico	0,51	0,20	55,3	28,2	16,5	1,20	3,93	Leve
La Chanchera	LCh3	Duracualf típico	0,43	0,17	42,2	37,7	20,2	1,22	3,04	medio
	LCh6	Duracualf típico	0,58	0,14	43,6	37,8	18,6	1,31	1,45	medio

Grado de alteración antrópica: Calificación subjetiva (leve, medio o severo) de acuerdo a condición del pastizal, cobertura, presencia de costras y/o sellos, sal en superficie, erosión, etc.

Tabla 5.9: Principales características edáficas, altitud y pendiente de los sitios seleccionados para los ambientes serranos.

Sitio	Código	Clasificación Taxonómica	Altitud promedio (m)	Pendiente promedio (%)	Profundidad Sólum (m)	Textura				Densidad Aparente (g cm ⁻³)	Materia Orgánica (%)	Ecogrupo vegetación
						grava (%)	arena (%)	limo (%)	arcilla (%)			
<i>Planicies altas, pendientes simples y largas</i>												
Arroyo La Tapa	<i>Pam1</i>	Argiudol lítico	1680	4,4	0,63	8,2	41,3	28,1	22,4	0,55	11,70	<i>I</i>
	<i>Pam2</i>	Argiudol lítico	1551	7,2	0,49	5,3	45,5	27,3	21,9	1,20	12,75	<i>I</i>
	<i>Pap1</i>	Indeterminado	1265	13,3	0,56	15,5	46,4	20,9	17,1	1,00	9,66	<i>VI</i>
	<i>Pap2</i>	Indeterminado	1602	14,0	0,36	2,5	45,2	29,3	23,1	1,29	13,59	<i>I</i>
<i>Laderas escarpadas, moderadas y suaves</i>												
Arroyo La Tapa	<i>Lae1</i>	Indeterminado	1220	21,5	0,40	8,1	49,1	27,4	15,4	1,10	10,11	
	<i>Lae2</i>	Indeterminado	1350	25,0	0,05	40,5	50,1	7,8	1,6	1,00	5,19	
	<i>Lam1</i>	Indeterminado	1363	16,0	0,41	19,1	45,4	20,6	14,9	1,35	11,47	<i>V</i>
	<i>Lam2</i>	Udorthent lítico	1380	17,2	0,09	34,1	40,7	14,5	10,7	0,80	9,10	<i>V</i>
	<i>Lam3</i>	Udorthent lítico	1650	19,2	0,16	32,0	36,8	20,6	10,7	0,93	9,13	<i>nd</i>
	<i>Las1</i>	Indeterminado	1265	5,6	0,24	22,1	49,8	14,9	13,2	1,12	10,39	<i>VII</i>
	<i>Las2</i>	Indeterminado	1461	9,1	0,66	21,2	39,2	23,4	16,2	1,05	12,09	<i>V</i>
	<i>Las3</i>	Indeterminado	1440	13,5	0,08	9,0	33,4	31,4	26,3	0,99	8,13	<i>V</i>
	<i>Las4</i>	Indeterminado	1298	7,9	0,19	3,3	46,9	27,9	22,4	1,10	10,11	
	<i>Valles cóncavos, áreas de recepción y transmisión</i>											
Arroyo La Tapa	<i>Vam1</i>	Indeterminado	1000	4,5	0,69	1,6	39,3	33,6	25,6	0,72	9,79	<i>III</i>
	<i>Vam2</i>	Indeterminado	1463	7,8	0,68	0,8	43,9	33,0	22,3	0,69	13,13	<i>III</i>
	<i>Vap1</i>	Indeterminado	1470	13,0	0,59	12,5	32,1	31,3	24,1	1,05	14,23	<i>IV</i>
	<i>Vap2</i>	Indeterminado	1408	14,3	0,63	20,3	39,3	20,8	19,6	1,22	12,73	
<i>Mallines, áreas cóncavas de acumulación superficial e hipodérmica</i>												
Arroyo La Tapa	<i>Mam1</i>	Indeterminado	1470	2,3	1,13	0,0	39,1	32,3	28,6	0,96	11,03	
	<i>Mam2</i>	Indeterminado	1360	2,8	0,75	0,0	29,3	38,9	31,7	0,80	14,53	<i>VIII</i>
	<i>Map1</i>	Indeterminado	1640	6,0	0,71	2,5	43,8	29,7	24,1	0,71	16,83	<i>VIII</i>

Ecogrupos de Vegetación: I a VII de acuerdo a Cantero *et al.* (1999), detallados en el Capítulo IV. *nd*: no disponible.

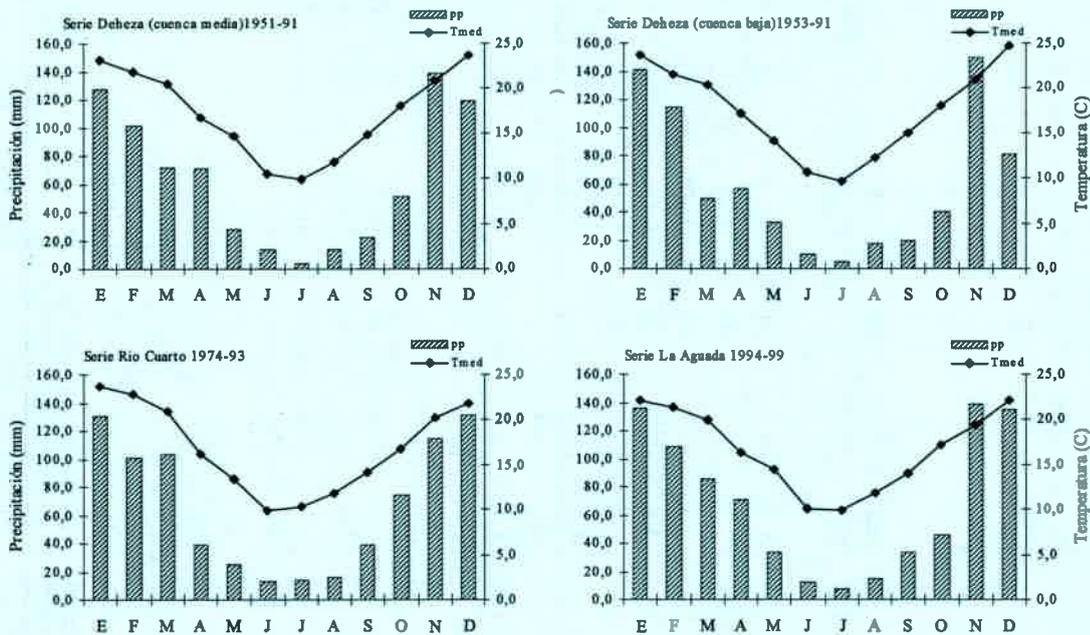


Figura 5.3: Precipitaciones medias mensuales y temperaturas medias mensuales en Gral. Deheza (32° 44' LS; 63° 43' LW; 311 msnm), Río Cuarto (33° 07' LS; 64° 14' LW; 421 msnm) y en La Aguada (32° 55' LS; 64° 43' LW; 535 msnm), utilizadas para el diseño de las simulaciones de los sitios correspondientes a la sub-región llanuras bien drenadas.

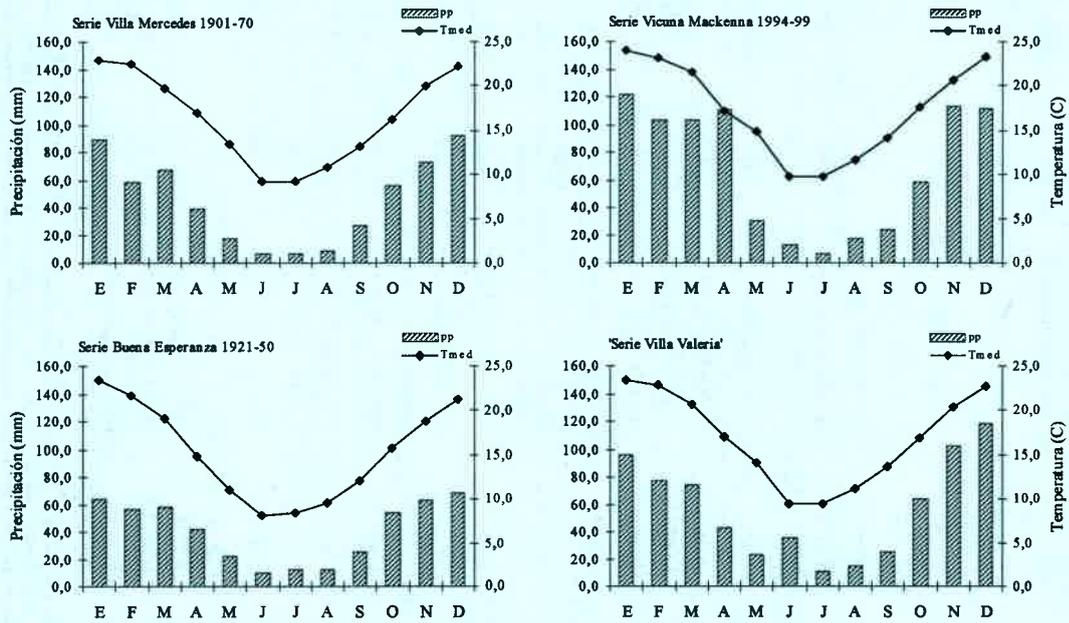


Figura 5.4: Precipitaciones medias mensuales y temperaturas medias mensuales en Villa Mercedes (33° 44' LS; 65° 23' LW; 487 msnm), Vicuña Mackenna (33° 47' LS; 64° 25' LW; 329 msnm), Buena Esperanza (34° 39' LS; 65° 18' LW; 320 msnm) y en Villa Valeria (34° 25' LS; 64° 55' LW; obtenido por triangulación entre las anteriores), utilizadas para el diseño de las simulaciones de los sitios correspondientes a la sub-región llanuras medanosas.

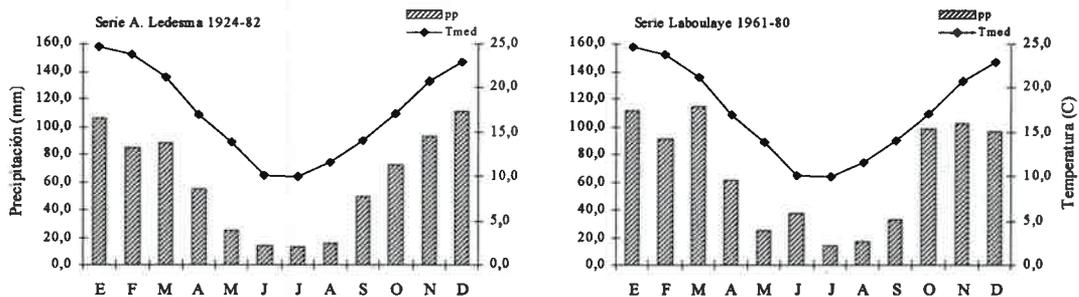


Figura 5.5: Precipitaciones medias mensuales y temperaturas medias mensuales en A. Ledesma (33° 20' LS; 63° 42' LW; 129 msnm) y en Laboulaye (34° 08' LS; 63° 24' LW; 138 msnm), utilizadas para el diseño de las simulaciones de los sitios correspondientes a la sub-región llanuras mal drenadas.

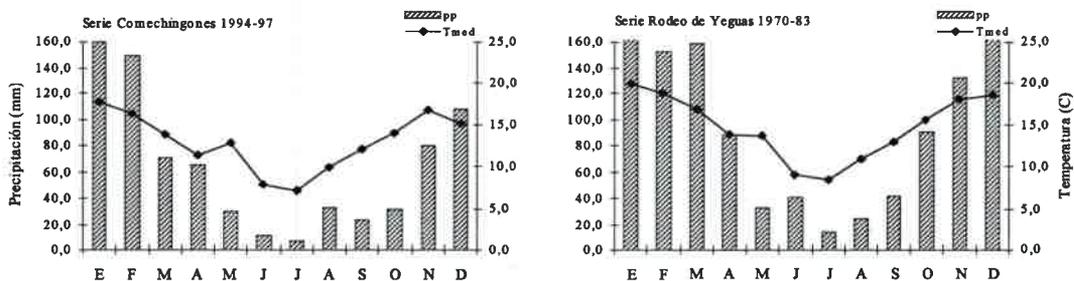


Figura 5.6: Precipitaciones medias mensuales y temperaturas medias mensuales en Comechingones (32° 41' LS; 64° 54' LW; 1420 msnm) y en Rodeo de Yeguas (32° 32' LS; 64° 40' LW; 1200 msnm), utilizadas para el diseño de las simulaciones de los sitios correspondientes a la sub-región serrana.

V.4 Diseño de las simulaciones

V.4.1 Definición de los agroecosistemas

Las simulaciones, en el modelo Century, se realizaron bajo el supuesto de coexistencia de dos tipos de agroecosistemas: Pastizales templados y Sabanas sub-húmedas. Esto permitió uniformar las condiciones iniciales de las simulaciones en las diferentes sub-regiones. En el presente estudio no se hace demasiado hincapié en las situaciones en el estado estacionario o de equilibrio natural, las cuales son abordadas ampliamente en el trabajo de Tittonell (2004), para las mismas situaciones bajo estudio. Sólo son consideradas, en las simulaciones, como punto de partida desde el cual se hace

correr el modelo con las alteraciones o modificaciones al sistema natural correspondientes a cada caso estudiado.

En el trabajo citado, los períodos bajo simulación fueron adoptados lo suficientemente prolongados como para alcanzar el estado de equilibrio a fin de evitar toda influencia de las condiciones iniciales de sitio sobre los resultados del modelo. Simulaciones durante 2000 a 5000 años en ambos tipos de ecosistemas fueron comparadas a fin de definir el período de simulación mínimo necesario para lograr condiciones de equilibrio.

Tabla 5.10: Condiciones iniciales para la simulación de la evolución del C edáfico hasta el estado de equilibrio, en ecosistemas de pastizal. Los contenidos de N, P y S en las diferentes fracciones han sido expresados en relación al C.

	Contenido de	Relación		
	C (g C m ⁻²)	C:N	C:P	C:S
<i>Fracción orgánica</i>				
Microbiana superficial	20	16	50	50
Activa	60	12	50	50
Estable	1250	17	117	117
Pasiva	740	8	62	62
<i>Residuos vegetales</i>				
Superficiales	100	66	300	300
Semi-incorporados	100	66	300	300
Biomasa radicular	150	50	375	375
Biomasa muerta en pie	50	62	250	250

Los pastizales naturales recibieron las condiciones iniciales que aparecen en la Tabla 5.10, y que corresponden a los valores por defecto que ofrecen los archivos de sitio del modelo para pastizales templados con predominio de Gramíneas C3 (Parton *et al.*, 1992). Se asume un período de receso anual de la vegetación durante los meses de invierno, y una evolución en la producción de biomasa que responde a las temperaturas y precipitaciones (ver Capítulo 3, Sub-modelos producción de biomasa).

Los montes naturales fueron simulados mediante la adopción de los parámetros iniciales correspondientes a una vegetación de tipo sabana templada (Tabla 5.11), ofrecidos por defecto en los archivos de sitio del modelo. La distribución espacial y la

competencia entre ambos estratos en una sabana son corrientemente simuladas a partir de estos parámetros de sitio, y son potencialmente capaces de emular las interacciones que ocurren en montes abiertos bajo pastoreo. Diferentes estructuras boscosas fueron arbitrariamente generadas para evaluar la sensibilidad del modelo frente a estos parámetros por Tiftonell (2004).

Tabla 5.11: Condiciones iniciales para la simulación de la evolución del C edáfico hasta el estado de equilibrio, en ecosistemas de sabana. Los contenidos de N, P y S en las diferentes fracciones han sido expresados en relación al C.

	Contenido de C (g C m ⁻²)	Relación		
		C:N	C:P	C:S
<i>Fracción orgánica</i>				
Microbiana superficial	30	13	50	50
Activa	190	10	50	50
Estable	2100	18	117	117
Pasiva	2800	7	62	62
<i>Residuos vegetales</i>				
Superficiales	100	88	300	300
Semi-incorporados	100	66	300	300
Biomasa radicular	200	133	444	444
Biomasa muerta en pie	50	62	250	250

La evolución natural de los pastizales y de las sabanas es simulada considerando una leve remoción por pastoreo (10 % de la biomasa aérea) que intenta representar la existencia de herbívoros nativos (Guanaco, *Lamma guanacoides*) en baja densidad poblacional. Resulta conveniente enfatizar que *Century Agroecosystems* es un modelo desarrollado para simular la evolución a largo plazo de los niveles de C en el suelo, y que la producción primaria es simulada a fin de estimar los aportes de residuos vegetales, y no necesariamente con valor predictivo. Esta simulación se realiza considerando varios supuestos –tipo de vegetación, homogeneidad, plagas, etc.- que a largo plazo disminuyen el nivel de precisión.

5.4.2 Definición de situaciones de uso y manejo

La variabilidad resultante de intentar representar las múltiples opciones de uso y manejo de los agroecosistemas, así como las particularidades de la historia de cada establecimiento se torna demasiado compleja para la aplicación de una herramienta de decisión a escala sub-regional. A fin de acotar dicha variabilidad y obtener resultados comparables, se adoptó el marco conceptual de la definición de situaciones de producción potencial, alcanzable y actual, propuesto por De Wit (1992). Sin embargo, por tratarse aquí básicamente del estudio de las condiciones de equilibrio y de la respuesta de los diferentes ecosistemas a la intervención antrópica, se ha adoptado una definición alternativa propuesta por Tiftonell (2004):

5.4.2.1 Situación Potencial

La situación de uso y manejo potencial representa aquí a una condición artificial que permite simular las propiedades de un determinado ecosistema en que la intervención antrópica se encuentra completamente ausente. La producción primaria y los flujos de materia y energía dentro del ecosistema responden exclusivamente a la oferta ambiental y a la capacidad de respuesta de la comunidad vegetal a dicha oferta. A fin de simular la evolución a un nivel de máxima tanto en pastizales como en sabanas, no se incluyó disturbio alguno en la simulación (ni siquiera el efecto de los herbívoros naturales).

5.4.2.2 Situación Natural

Bajo esta definición se intentó representar la condición natural en la que se encuentran los pastizales y montes poco o nada alterados por la intervención antrópica (condición leve o moderadamente alterada en la sección anterior). Para ello se involucró la presencia de herbívoros naturales en baja densidad poblacional durante la evolución de los ecosistemas, y la inclusión del ganado vacuno en forma paulatina desde la colonización de las sub-regiones. Resulta difícil establecer el momento exacto en que comenzó la actividad pecuaria –y más aún su intensidad- en los diferentes sitios. La solución de compromiso propuesta en este estudio es la asignación de una intensidad de

pastoreo en aumento durante los últimos 300 años en las zonas de mayor concentración de habitantes (Llanuras bien drenadas) y de 200, 150 o 100 años en zonas más despobladas (Llanuras mal drenadas, medanosas, ambientes serranos). La intensidad de pastoreo simulada aumenta desde 10 a 25 % de remoción de la biomasa aérea desde la inclusión del ganado. Una remoción del 25 % no resulta lo suficientemente elevada como para afectar a la producción del pastizal (de acuerdo a los parámetros del modelo) e incluso puede favorecer la ventaja competitiva de la vegetación arbórea.

5.4.2.3 Situación Actual

Bajo esta definición se intentó representar a las diferentes situaciones de uso y manejo que es posible identificar en las sub-regiones. Una serie de esquemas de manejo fueron arbitrariamente definidos para la simulación de la evolución de los niveles de C en el suelo durante el siglo XX, a fin representar la heterogeneidad encontrada en las situaciones reales (ver descripción en el Capítulo anterior). Estos esquemas de manejo fueron simulados partiendo de los resultados obtenidos en los diferentes sitios bajo condiciones naturales a inicios del siglo XX y sus características principales se resumen a continuación:

Pastoreo 1: Representa una situación de uso pastoril de baja intensidad durante 100 años, en la que la remoción del pastoreo afecta a la productividad del pastizal en forma lineal (parámetros GL en Century). El pastoreo remueve sólo parte de la biomasa anualmente producida con una intensidad del 30 %. No incluye desmontes ni labranzas.

Pastoreo 2: Representa una situación de uso pastoril de intensidad media durante 100 años, en la que la remoción del pastoreo afecta a la productividad del pastizal en forma cuadrática, así como a la relación raíz:vástago de la vegetación herbácea (parámetros GM en Century). El pastoreo remueve la biomasa anualmente producida y parte de la vegetación muerta en pie, con una intensidad del 60 %. No incluye desmontes ni labranzas.

Desmorte 1: Representa una situación de uso pastoril de intensidad media durante los últimos 100 años sobre un pastizal proveniente del desmorte de la vegetación

natural a comienzos del siglo XX, a fin de representar el efecto de la colonización de la región. No incluye labranzas.

Desmonte 2: Representa una situación de uso pastoril de intensidad media durante los últimos 100 años sobre un pastizal proveniente del desmonte de la vegetación natural en la década de 1960, a fin de representar el efecto de la intensificación agropecuaria durante los últimos años en la región. No incluye labranzas.

Labranza 1: Representa una situación de uso agrícola-ganadero con pastoreo de intensidad media durante los últimos 50 años, en la cual se implantan periódica y alternativamente pasturas semi-permanentes y cultivos anuales, sin fertilización.

Labranza 2: Representa una situación de uso agrícola durante los últimos 50 años en la cual se implantan periódica y alternativamente verdeos y cultivos anuales, sin fertilización.

Estas variantes de manejo no intentan representar a todas las combinaciones posibles, pero permiten generar una base de comparación en común, para evaluar la utilidad del modelo como herramienta de monitoreo y predicción de la respuesta de los ecosistemas a la intervención antrópica. En el diseño de las simulaciones se utilizó una diferente combinación de estos esquemas para cada sitio de muestreo, de acuerdo a la información sobre la historia de uso y manejo que fue posible recabar en cada caso particular. Las mismas serán detalladas en el capítulo siguiente al analizar y discutir los resultados obtenidos.

5.4.3 Alternativas de manejo de corto y mediano plazo

En aquellas situaciones en las que la capacidad de predicción del modelo demostró un nivel de ajuste aceptable, fue posible plantear escenarios de uso y manejo de las tierras a futuro. Esto permite acercar una idea sobre la capacidad de reacción de los agroecosistemas frente a ciertas variables de manejo tendientes a su recuperación, o frente a cambios operados en los componentes socio-económico (por ej. intensificación de ciertas actividades, variaciones de mercado, etc.) y/o ambiental (por ej. cambio climático).

Para analizar la capacidad y sensibilidad del modelo Century como herramienta de monitoreo y evaluación de la calidad edáfica y sustentabilidad de los sistemas

productivos, se plantearon tres sistemas de uso y manejo de las tierras bien contrastantes, de manera que la mayor parte de los posibles sistemas de uso y manejo utilizados por los productores locales queden comprendidos dentro del rango de valores arrojados por el modelo. Los escenarios de manejo planteados son:

- (1) monocultivo de soja bajo labranza convencional,
- (2) rotación maíz-soja bajo siembra directa,
- (3) rotación agrícola-ganadera, consistente en seis años de alternancia de los cultivos maíz y soja bajo siembra directa y cuatro años de praderas polifíticas.

En el diseño de tales esquemas de manejo se consideró la utilización de herbicidas para el control químico de malezas, y la aplicación de fertilizantes nitrogenados y/o fosforados, según se trate de cultivos de gramíneas o leguminosas.

Las condiciones iniciales para tales simulaciones resultan de los valores obtenidos de las simulaciones de largo plazo o bien de una combinación de estos con valores medidos para tales situaciones (por ej. densidad aparente, nivel inicial de C en el suelo, etc.). Normalmente este tipo de simulaciones fueron realizadas para un horizonte temporal de 50 años y serán descritas y discutidas extensamente en los siguientes capítulos.

5.5 Análisis y procesamiento de información y resultados

5.5.1 Factores de control sobre los niveles de C y propiedades derivadas

La información obtenida mediante los relevamientos a campo fue relacionada con los gradientes ambientales de diversa índole, identificados en las sub-regiones. El contenido de C orgánico en el horizonte superficial de los suelos bajo situaciones de baja alteración antrópica (asumidas aquí como situaciones de equilibrio) fue relacionado con las variaciones en altitud, temperatura, precipitaciones, textura y tipo de vegetación. Para ello se identificaron gradientes de cada una de las variables mencionadas que pudieran diferenciarse a través de condiciones comparables. Una misma clase textural, con un régimen térmico relativamente invariable, medida a través de un gradiente de

precipitaciones, permite estimar el efecto de estas últimas sobre los niveles de C (asumiendo que otras condiciones se mantienen dentro de cierto rango, por ej. vegetación).

Para el estudio de la variación de las propiedades edáficas en relación con el contenido de C orgánico del horizonte superficial se siguió a Tittonell (2004), quien recurrió al uso de modelos existentes (Bennema, 1966; Boekel, 1986) y de la información disponible sobre las propiedades a estimar, e intentó determinar los parámetros de tales modelos bajo condiciones locales a través de procedimientos de ajuste de los datos a las funciones descritas en ellos en forma iterativa.

5.5.2 Evaluación de los resultados de las simulaciones

El grado de ajuste de los resultados de las simulaciones respecto de los valores observados fue caracterizado a través de regresión lineal simple, se ajustó un modelo lineal y se analizó su varianza respecto de las observaciones. Este procedimiento fue conducido para la totalidad de los resultados (ajuste regional) así como para conjuntos parciales correspondientes a una determinada sub-región o sitio. El procesamiento estadístico de los resultados se realizó mediante el apoyo del programa informático Statistix for Windows, versión 1996.

5.5.3 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad de un modelo implica, de manera estricta, el estudio de la variación de sus resultados en función de variaciones graduales en el valor de sus parámetros. En el presente estudio, en el cual no se pone especial énfasis en la validación del modelo –que fue realizado por Tittonell (2004)-, se realiza sólo un análisis de la sensibilidad del valor predictivo de las simulaciones frente a variaciones de las variables de sitio (series climáticas, clase textural, etc.) y de las condiciones iniciales (que incluyen además algunos parámetros). De esta forma, aunque el término no resulta absolutamente correcto dentro de la terminología de modelación, se adoptó aquí con el significado descrito.

La sensibilidad parcial relativa del modelo fue calculada mediante la siguiente expresión:

$$Spr = (dR / R) / (dX / X)$$

Donde,

Spr: sensibilidad parcial relativa del modelo frente a cambios relativos en el valor de una variable *X*,

dR / R: variación relativa de los resultados del modelo,

dX / X: variación relativa de la variable *X* (cuando la variable es precipitación, $X = P$, etc.).

Los resultados sobre los que se estudió la sensibilidad del modelo corresponden a la evolución de las diferentes fracciones de C en el agroecosistema.

5.5.4 Efectos del uso y manejo

Los efectos simulados provocados por el uso de las tierras bajo los diferentes esquemas de manejo adoptados para las simulaciones fueron estudiados a través de cambios operados sobre las variables de estado del modelo para las componentes suelo, biomasa y residuos vegetales. Se realizaron balances de C considerando a los diferentes compartimentos (fracciones), bajo las situaciones de uso y manejo adoptadas. Estos balances abarcan períodos de simulación de 50 años, y acercan una estimación de las pérdidas de C de los agroecosistemas que puede traducirse indirectamente en volúmenes de emisión de CO₂ hacia la atmósfera.

5.5.5 Efectos del Cambio Climático Global

A partir de las predicciones realizadas en el último informe del IPCC (2007) sobre los cambios que podrían producirse en el clima de la región bajo estudio, se plantearon diferentes escenarios de cambio climático para analizar su efecto sobre la evolución de la materia orgánica edáfica durante los próximos 50 años en algunos de los sitios muestreados.

Los tres escenarios de cambio climático planteados para realizar las simulaciones con el modelo Century son:

- 1- Mantenimiento de las condiciones climáticas actuales de cada uno de los sitios seleccionados durante los próximos 50 años (clima actual).
- 2- Incremento de la temperatura media anual en 2 °C, más un aumento del 20% en las precipitaciones (> T° y > PP).
- 3- Incremento de la temperatura media anual en 2 °C, manteniendo el nivel actual de las precipitaciones (> T°).

En todos los casos, las simulaciones con cada uno de los escenarios de cambio climático, se realizaron considerando que se mantiene el uso y manejo actual de cada sitio durante el período analizado. Para que sea posible diferenciar los efectos del cambio climático y del uso de las tierras sobre la evolución del C orgánico, los resultados de las simulaciones se presentan expresados como la variación porcentual del C edáfico superficial obtenido con cada escenario climático, respecto al contenido que presentaría cada sitio si se mantuvieran las condiciones climáticas actuales. Para más detalles acerca del diseño de las simulaciones ver el Capítulo 6 – Resultados y discusión.

Capítulo 6: Resultados y discusión

6.1 Ponderación de las variables del modelo

El nivel de materia orgánica edáfica en condiciones naturales está determinado por un equilibrio entre la granulometría de la fracción mineral, el clima y la vegetación (Tittonell, 2004). Estos niveles de equilibrio son afectados de manera variable por el hombre en función del tipo de uso y manejo que de las tierras se realice. En este punto se pretende analizar los distintos factores que afectan el nivel de materia orgánica edáfica a través de los gradientes que presenta cada uno de ellos a escala regional.

6.1.1 Gradiente textural

Numerosos investigadores han observado la existencia de una relación entre el contenido de materia orgánica y la granulometría de la fracción mineral del suelo (Paul *et al.*, 2001, Feller & Beare, 1997; Ladd *et al.*, 1985; Merckx *et al.*, 1985, Sorensen, 1972). Tres mecanismos de estabilización de la materia orgánica del suelo fueron propuestos: (1) estabilización química, (2) protección física y (3) estabilización bioquímica (Christensen, 1996; Stevenson, 1994), entre los cuales los dos primeros dependen en gran medida del tipo y contenido de arcillas.

Hassink (1997) estableció que el C asociado a complejos organo-minerales primarios se encuentra químicamente protegido, y que el grado de protección aumenta con el incremento de la fracción arcilla+limo, lo cual fue corroborado además mediante estudios micro-biológicos (Guggenberg *et al.*, 1999; Puget, *et al.*, 1999; Chantigny *et al.*, 1997).

A partir de sus observaciones, Hassink (1997) definió la capacidad de los suelos para preservar C mediante su asociación con partículas de arcilla y limo (potencial de saturación), aunque no consideró al C asociado a la fracción arena, cuya correlación con la textura fue muy débil. La relación propuesta por Hassink (1997) varía de acuerdo al tipo de arcilla, al método de determinación de la fracción arcilla + limo (0 a 20 μ vs. 0 a 50 μ) y de acuerdo al sistema de uso de la tierra, y que la cantidad de C asociada a esta fracción puede ser reducida por laboreo del suelo.

La relación observada aquí entre la fracción arcilla + limo y el contenido de C orgánico muestra la misma tendencia que la reportada por dichos autores, aunque con muy bajo nivel de ajuste (Figura 6.1). Esta falta de ajuste general podría estar causada por diferentes factores. Por un lado, Hassink (1997) reportó una relación más estrecha cuando se consideró la fracción limo de 2-20 μ . En cambio, en este estudio la misma fue considerada de 2-50 μ , por ser la más frecuentemente determinada en los suelos de la región. Por otro lado, al considerar todos los sitios de muestreo se están integrando condiciones agroecológicas muy contrastantes que enmascaran el efecto de la granulometría sobre el C orgánico (desde situaciones naturales hasta muy antropizadas y para diferentes condiciones climáticas y geomorfológicas).

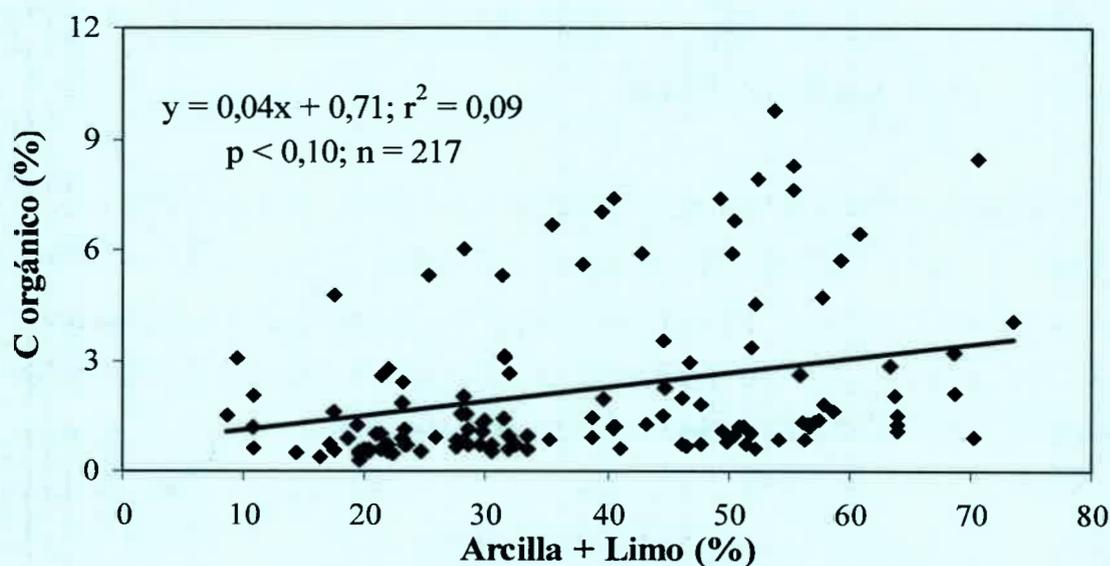


Figura 6.1: Relación entre la fracción Arcilla + Limo (%) y el contenido de C orgánico total (%) en los horizontes superficiales de los suelos de la región bajo estudio.

Por tal razón, se procedió a discriminar entre las diferentes condiciones para analizar de manera más precisa el efecto de la granulometría sobre el contenido de C orgánico. En la figura 6.2 se observa la relación entre el contenido de arcilla + limo y el contenido de C orgánico para los horizontes superficiales de los suelos de las distintas sub-regiones estudiadas.

El incremento en el porcentual de C orgánico con el aumento en el contenido de arcilla + limo en la fracción mineral sólo se observa en la llanura bien drenada y en la sierra y el pedemonte (Figura 6.2), con incrementos del 3 y 8 , respectivamente por cada punto de aumento en la fracción arcilla + limo.

Dicha tendencia no se observa en el caso de la llanura mal drenada, probablemente por efecto de la intrazonalidad, ni en la llanura medanosa, afectado probablemente en mayor medida por el clima y/o el tipo de vegetación.

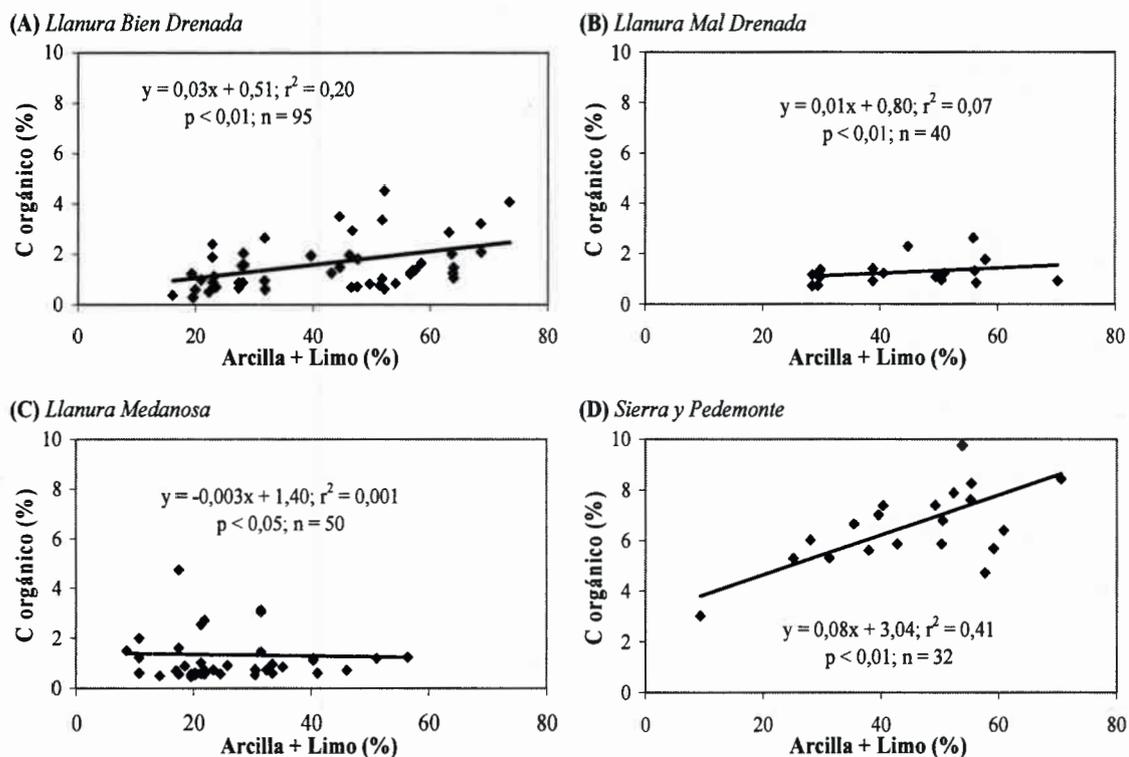


Figura 6.2: Relación entre la fracción Arcilla + Limo (%) y el contenido de C orgánico total (%) en los horizontes superficiales de los suelos de la llanura bien drenada (A), de la llanura mal drenada (B), de la llanura medanosa (C) y de la sierra y el pedemonte (D).

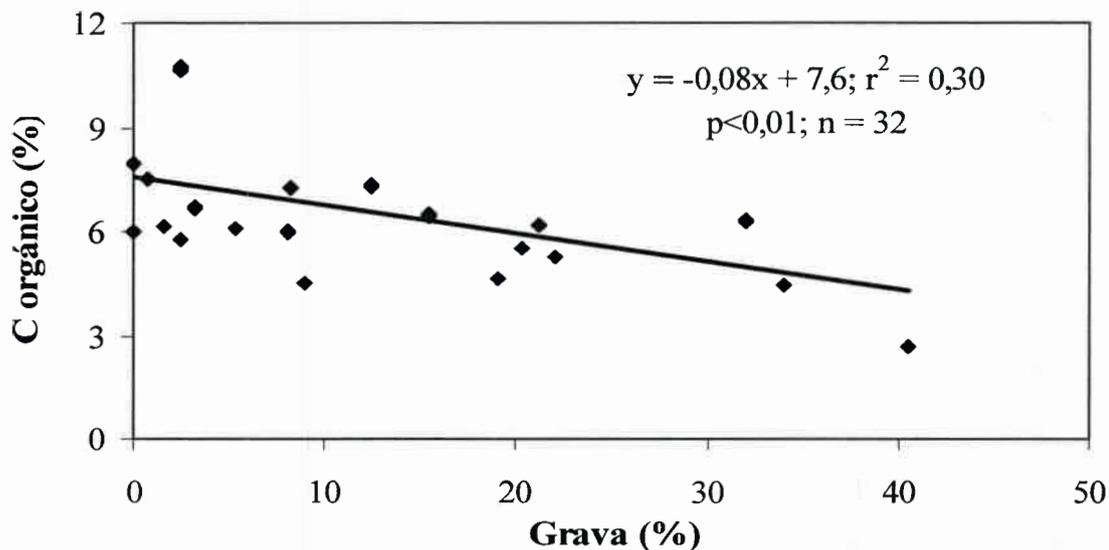


Figura 6.3: Relación entre el contenido de grava (%) y el de C orgánico total (%) en los horizontes superficiales de los suelos de la sierra y el pedemonte.

Por otra parte, en la sierra y el pedemonte, la presencia de grava en la fracción mineral del suelo afecta el contenido de C orgánico edáfico en la misma proporción (8 %) que la fracción arcilla + limo, pero en forma inversa (Figura 6.3). Cabe aclarar, que los valores de materia orgánica en suelos con presencia de grava, fueron corregidos según su proporción en peso.

De acuerdo a lo observado por Tittonell (2004), la relación entre el contenido de C orgánico y la granulometría del suelo, también es afectada por el uso actual de las tierras. El incremento porcentual del contenido de C en función de la fracción arcilla + limo disminuye con el grado de alteración antrópica (Figura 6.4). El nivel de C orgánico aumenta 7 % para la situación de monte, 4 % bajo pastizal y prácticamente se hace nulo en situaciones agrícola.

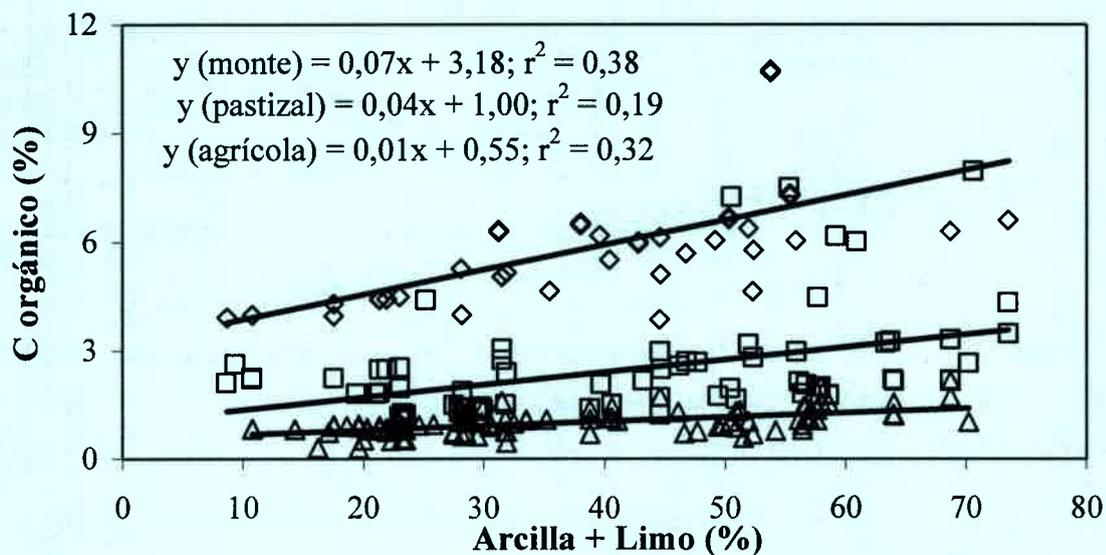


Figura 6.4: Relación entre la fracción Arcilla + Limo (%) y el contenido de C orgánico total (%) en los horizontes superficiales de los suelos bajo situación de monte (rombos), de pastizal (cuadrados) y agrícola (triángulos).

A diferencia de lo reportado por los autores citados precedentemente, en este trabajo se observó mayor grado de ajuste del contenido de C orgánico con el porcentual de arcilla que con la arcilla + limo (Figura 6.5). Estas diferencias podrían deberse al incremento de la variabilidad generada por considerar a la fracción limo entre 2 y 50 μ por un lado, y a la mayor acción protectora sobre la materia orgánica de la arcilla frente al limo, por el otro. Sin embargo, para los suelos de la llanura mal drenada y de la llanura medanosa tampoco se observó la acción protectora de la fracción mineral sobre

la materia orgánica edáfica (Figura 6.6). Vale la pena destacar que las observaciones de la llanura medanosa se encuentran en un rango menor del porcentual de arcilla, sin superar en ningún caso el valor de 15%.

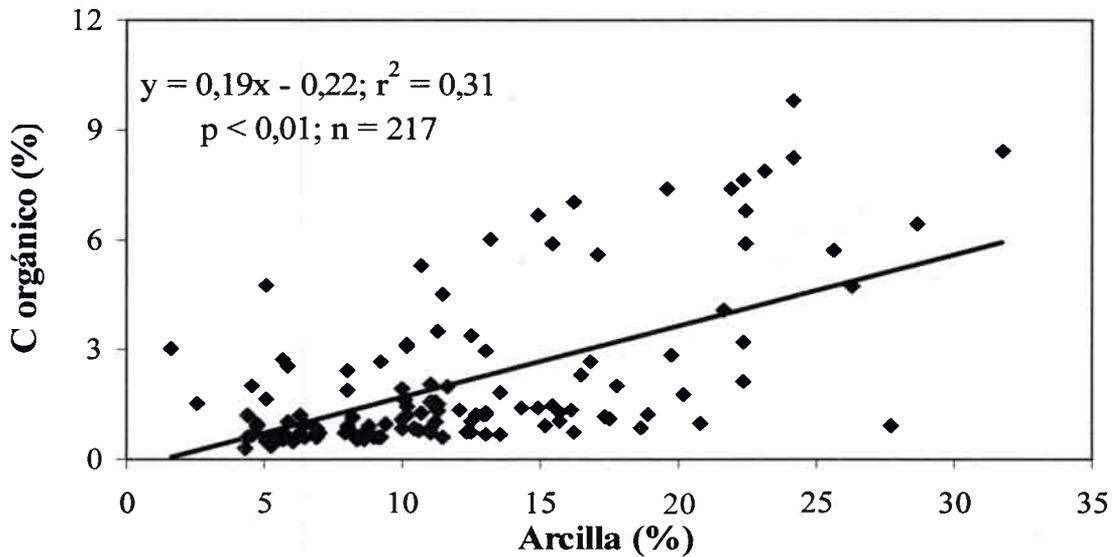


Figura 6.5: Relación entre los contenidos de arcilla (%) y de C orgánico total (%) en los horizontes superficiales de los suelos de la región bajo estudio.

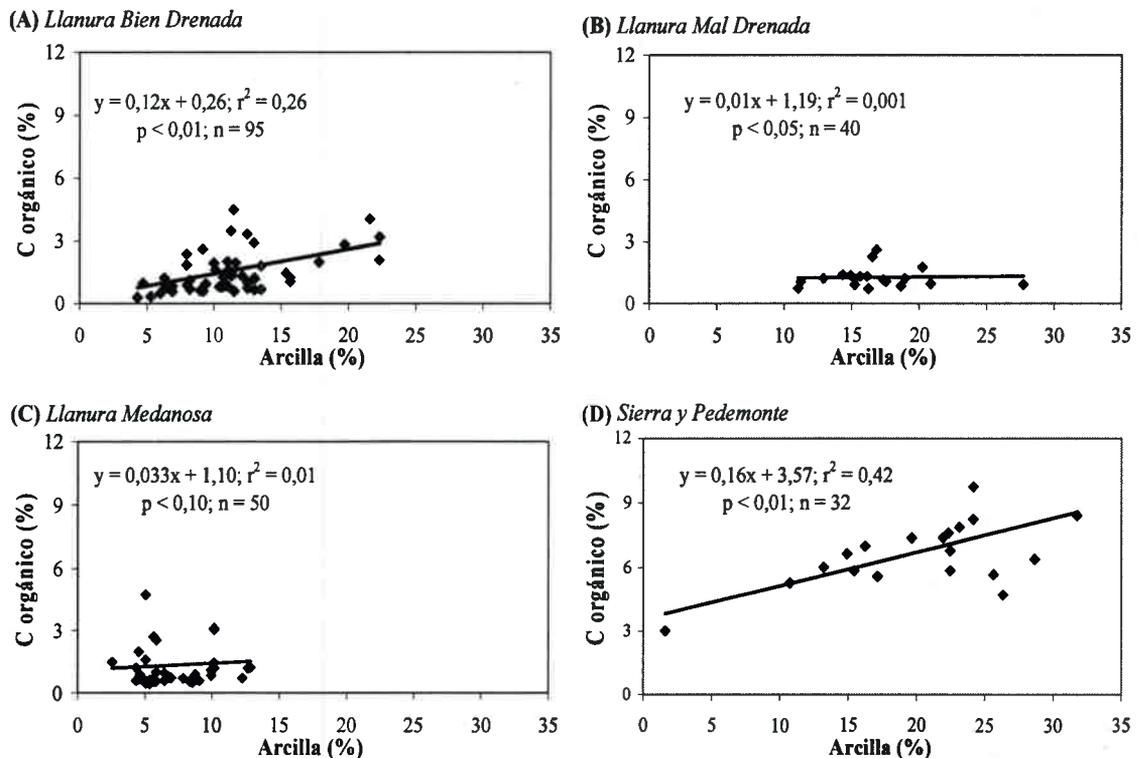


Figura 6.6: Relación entre los contenidos de arcilla (%) y de C orgánico total (%) en los horizontes superficiales de los suelos de la llanura bien drenada (A), de la llanura mal drenada (B), de la llanura medanosa (C) y de la sierra y el pedemonte (D).

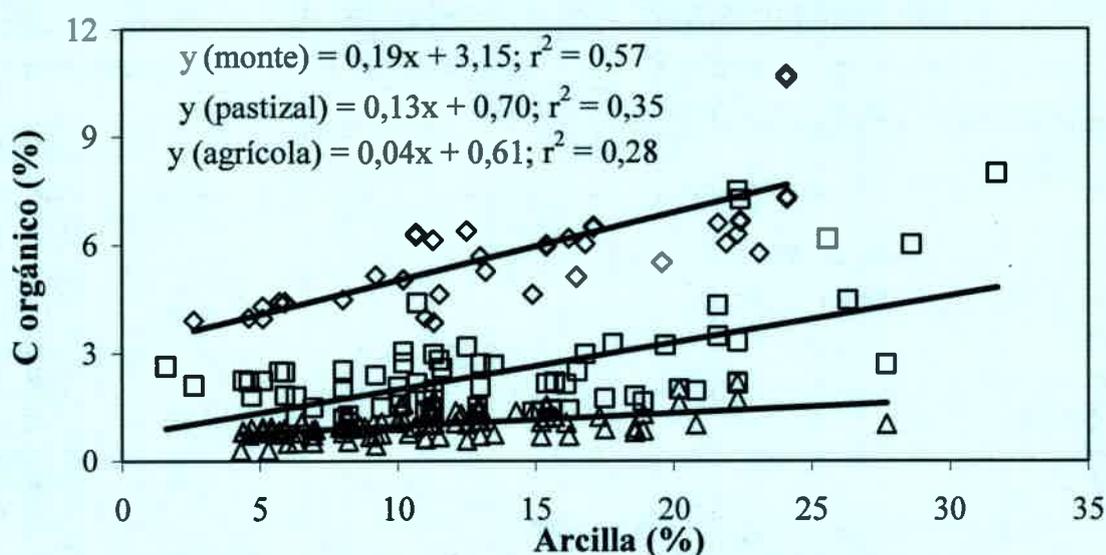


Figura 6.7: Relación entre los contenidos de arcilla (%) y de C orgánico total (%) en los horizontes superficiales de los suelos bajo situación de monte (rombos), de pastizal (cuadrados) y agrícola (triángulos).

Al analizar la relación entre el contenido de C orgánico (%) y el de arcilla (%) para las diferentes situaciones de uso de la tierra, se observan mejores ajustes y mayores pendientes que para el contenido de arcilla + limo (Figuras 6.4 y 6.7). Sin embargo, en ambos casos la magnitud de las pendientes de las rectas de regresión disminuyen al pasar de la situación de monte a la agrícola, pasando por la de pastizal.

El sistema de uso de la tierra genera modificaciones en las propiedades físico-químicas del suelo. La siembra directa mantiene la estructura del suelo, facilitando la infiltración del agua y permitiendo una mayor exploración radical. Así mismo provoca un menor grado de oxidación de la materia orgánica del suelo debido a que los agregados protegen al C orgánico (Puget y Lal, 2004; Irizar *et al.*, 2006).

En contraste, la labranza convencional, al utilizar el arado de reja y vertedera, invierte el suelo, generalmente los primeros 20 cm, provocando la ruptura de la estructura, fundamentalmente los macro-agregados de tamaño mayor a 250 μ , estimulando una mayor aireación, aumentando en consecuencia, la velocidad de descomposición de los residuos de cosecha (Zotarelli *et al.*, 2007) y la tasa de mineralización de los nutrientes, particularmente N y P, lo que conduce a una mayor fertilidad actual.

Sin embargo, la materia orgánica edáfica presenta una composición heterogénea, que incluye compuestos como azúcares simples, fácilmente mineralizables, y productos recalcitrantes, surgidos de transformaciones microbianas (Zagal *et al.*, 2002; Irizar *et al.*, 2006). La variación del contenido de materia orgánica es generalmente lenta, y para visualizar cambios significativos se necesitan datos a largo plazo. Esto generó la necesidad de cuantificar fracciones lábiles, capaces de cambiar rápidamente frente a alteraciones en el manejo de los ecosistemas (Irizar *et al.*, 2006). Estas fracciones se encuentran formadas por partículas con el tamaño de las arenas, restos de animales, plantas y microorganismos, transformados o mineralizados de manera incompleta, que son la primera fuente de humus (Cambardella y Elliott, 1992; Zagal *et al.*, 2002). Su tiempo de reciclado es menor a una década (Irizar *et al.*, 2006).

Existen distintos tipos y criterios de fraccionamiento de la materia orgánica edáfica. Cambardella y Elliott (1992) denominaron C orgánico particulado o materia orgánica particulada a la fracción activa o lábil. El C particulado es un indicador a corto plazo de los niveles de nutrientes, especialmente del N, fácilmente mineralizable del suelo (Diovisalvi *et al.*, 2006) bajo distintas situaciones de manejo, ya que es un sustrato fácilmente descomponible por los microorganismos (Koutika *et al.*, 2008).

Las diferentes fracciones de la materia orgánica edáfica son el resultado de los distintos grados de protección/estabilización alcanzados a raíz de su interacción con la fracción mineral del suelo. El papel de estas fracciones más lábiles como fuente de nutrientes en la productividad agrícola, determina que su cuantificación sea esencial para orientar en la elección de las prácticas más sustentables de manejo del suelo (Apezteguía y Sereno, 2002; Zagal *et al.*, 2002; Koutika *et al.*, 2008). El modelo Century simula la distribución del C orgánico entre diferentes compartimentos que representan a las fracciones activa, estable y pasiva de la materia orgánica.

En la Figura 6.8 se grafica la relación existente entre el porcentual de arcilla + limo y el contenido de las diferentes fracciones de C edáfico. En la misma se observa que la fracción pasiva es la única que presenta una tendencia positiva medianamente clara, aunque con un bajo grado de ajuste (Figura 6.8C). Esta fracción orgánica es la más íntimamente ligada a los compuestos minerales y por ende la que resulta más fuertemente protegida, y de ahí que resulte lógico que su relación con la fracción arcilla + limo no se vea tan afectada por otras variables como el clima, la vegetación y/o el uso de las tierras.

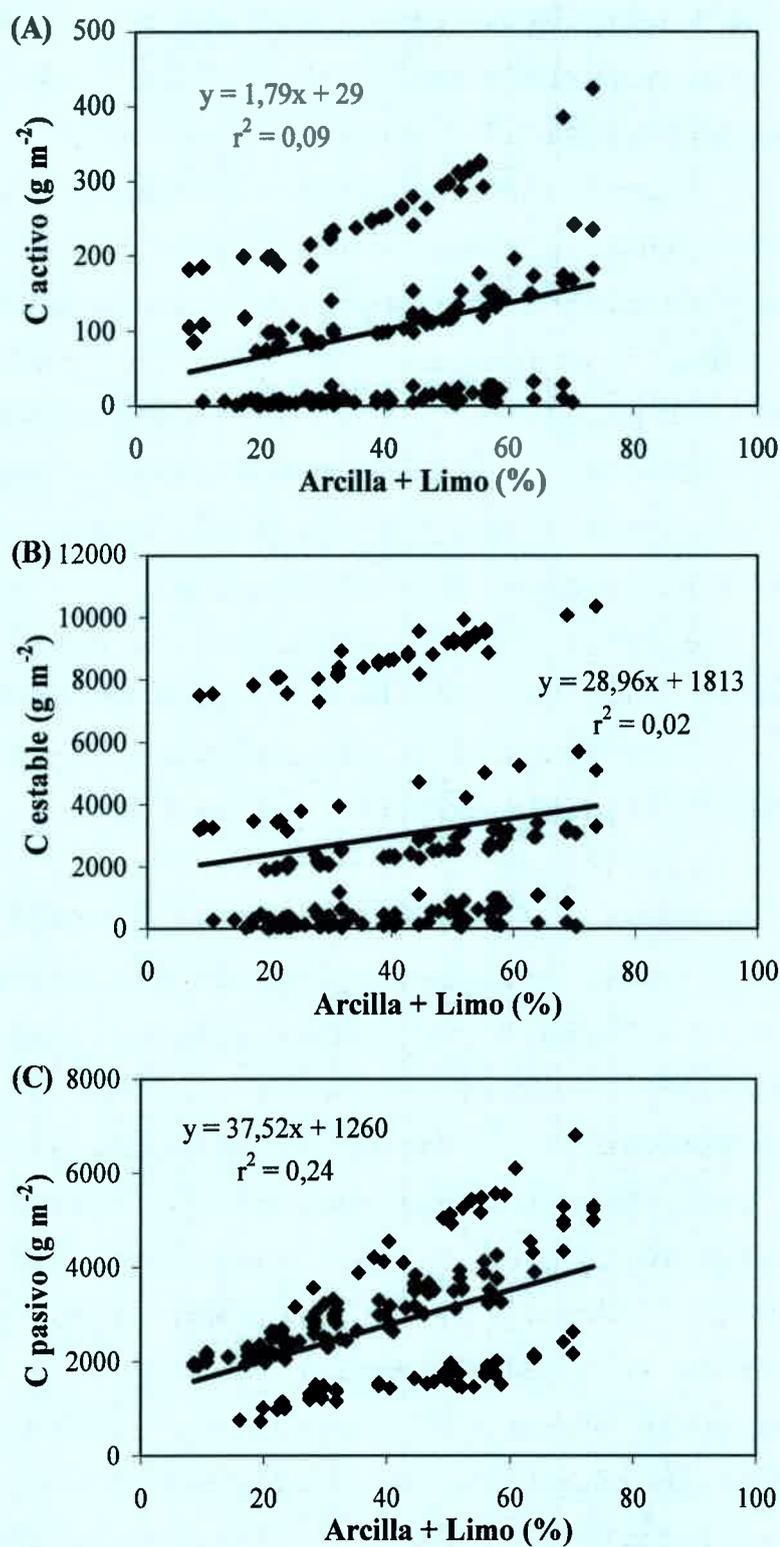


Figura 6.8: Relación entre el porcentual de Arcilla + Limo y el contenido de C activo (A), C estable (B) y C pasivo (C) en los horizontes superficiales de los suelos de la región bajo estudio.

Al analizar estas relaciones discriminando entre las distintas sub-regiones, queda claramente demostrado que el bajo grado de ajuste entre la arcilla + limo y la fracción

pasiva de la materia orgánica observado en la Figura 6.8C se debe a la interferencia que genera la intrazonalidad de los sitios de muestreo de la llanura mal drenada (Figura 6.9).

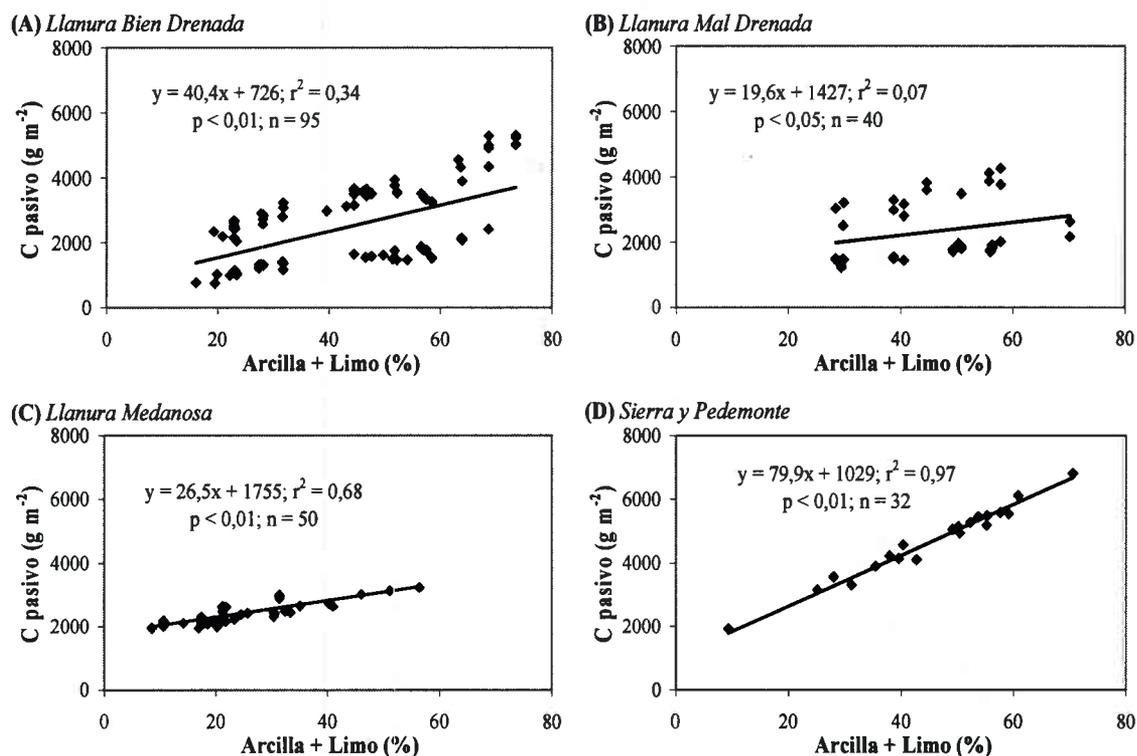


Figura 6.9: Relación entre el contenido de Arcilla + Limo (%) y el del C pasivo (g m^{-2}) en los horizontes superficiales de los suelos de la llanura bien drenada (A), de la llanura mal drenada (B), de la llanura medanosa (C) y de la sierra y el pedemonte (D).

Si bien, las fracciones activas y estables también muestran una tendencia positiva con el incremento de la arcilla + limo, presentan una extremadamente alta variabilidad vertical en la figura, producto de su mayor susceptibilidad frente a los otros tipos de variables antes mencionados. En la Figura 6.8A y B, se evidencia claramente la existencia de conjuntos de puntos a distintos niveles de C. Cada uno de estos conjuntos mantienen una relación creciente con el contenido de arcilla + limo pero con pendientes diferentes entre sí, reflejando distintas respuestas a las condiciones de uso y manejo particulares de las tierras (Figura 6.10).

Las tres fracciones de C orgánico presentaron pendientes de menor magnitud bajo situación agrícola que bajo las situaciones de monte o pastizal, demostrando que la protección de la fracción mineral del suelo, no impide el efecto negativo del uso agrícola, ni siquiera sobre la fracción pasiva del C orgánico. En el C activo y en el estable se observa un patrón similar en la distribución de los puntos de muestro con

claras diferencias en el nivel de los valores de C para cada una de las situaciones analizadas (Figura 6.10).

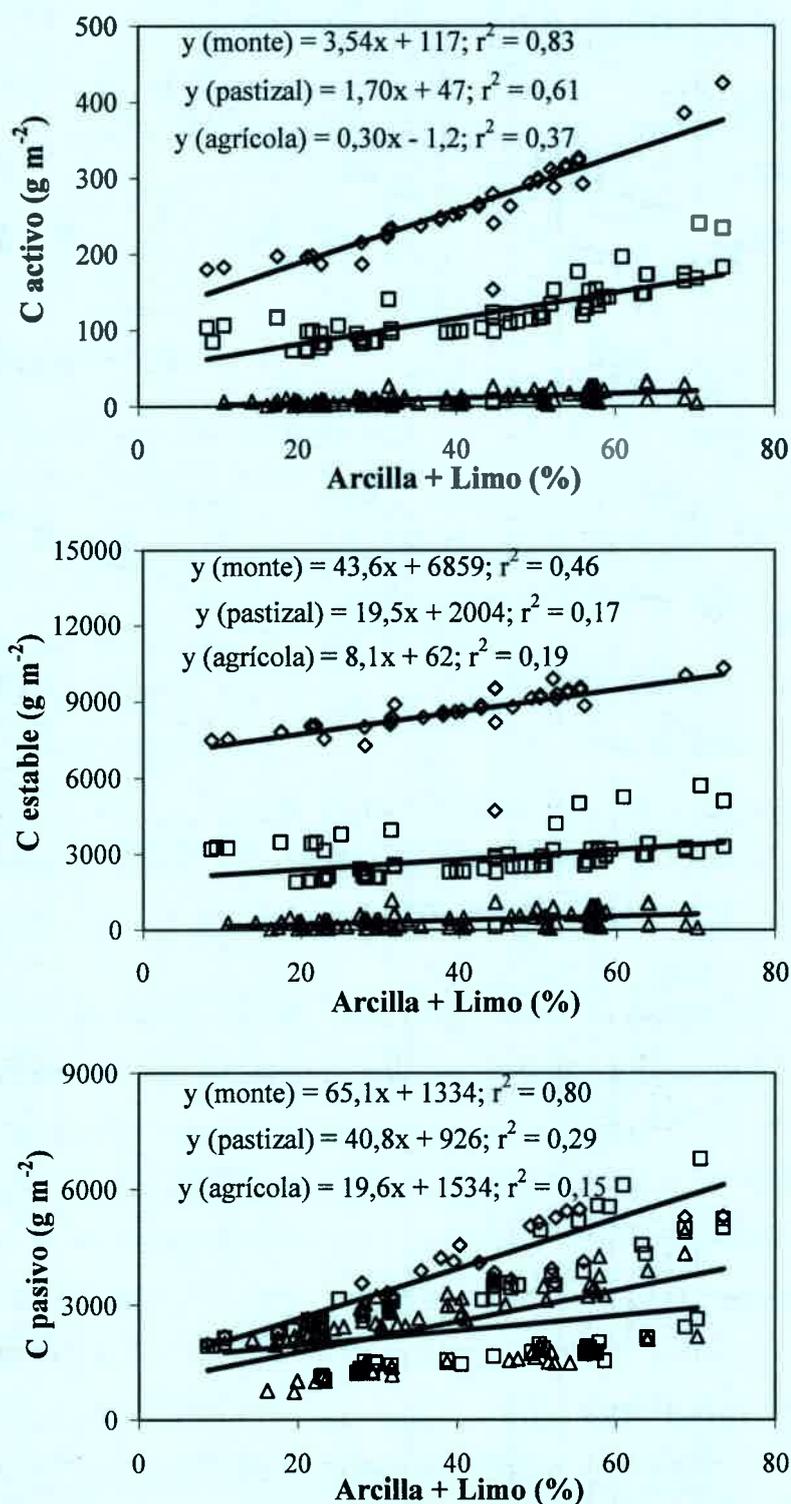


Figura 6.10: Relación entre el contenido de Arcilla + Limo (%) y el contenido de las diferentes fracciones de C orgánico (g m^{-2}) en los horizontes superficiales de los suelos de la región bajo estudio. C pasivo (rombos), C estable (cuadrados) y C activo (triángulos).

En cambio, el C pasivo presenta una distribución diferente, con mayores valores para la situación agrícola que para la de pastizal en niveles bajos de arcilla + limo, como consecuencia de la menor variabilidad vertical encontrada en la distribución de los puntos. La textura afecta las tasas de transformación de las fracciones de C orgánico, mientras que el tipo de vegetación afecta la cantidad y calidad de los aportes orgánicos (lignina:N), los cuales pueden ser modificados por el uso y manejo (Figura 6.10).

Independientemente de los valores absolutos de cada una de las fracciones de la materia orgánica edáfica, es importante cuantificar la proporción de cada una de ellas respecto del contenido total y analizar su evolución frente a distintas condiciones de uso y manejo de la tierra, ya que esta resulta ser un indicador muy sensible del estado de deterioro de un suelo.

Si bien la fracción activa se encuentra en proporciones mucho más bajas que la estable y la pasiva, su importancia para la evaluación y el monitoreo de calidad de suelos reside en su mayor fragilidad frente al uso, en que constituye una importante fuente de nutrientes para los cultivos, y en que representa al tipo principal de C comúnmente acumulado en el suelo como resultado de prácticas conservacionistas o de recuperación de suelos, como por ejemplo la siembra directa (Palma *et al.*, 1997; Calegari *et al.*, 1998). El potencial de los suelos en su contribución a la dinámica de fijación/liberación de CO₂ depende también en gran medida de la dinámica de la fracción de C no protegida (Paustian *et al.*, 2000).

Considerando todos los puntos de muestreo de la región bajo estudio, la proporción relativa promedio presentó valores de 1,4 %, 39,0 % y 59,6 % para las fracciones activas, estables y pasivas, respectivamente. Estas proporciones se mantienen para todo el rango de arcilla + limo en los suelos de la llanuras bien y mal drenadas, pero presentan cambios en el caso de la llanura medanosa y de la sierra y pedemonte (Figura 6.11).

Aunque con valores relativos diferentes y a distintas tasas, en ambas sub-regiones, el C pasivo aumenta con el incremento en el porcentual de arcilla + limo, a expensas de una disminución en la proporción relativa del C estable (Figura 6.11).

Por otra parte en estas dos sub-regiones se presentan ciertas particularidades en las proporciones relativas de las diferentes fracciones. A diferencia de lo observado en el resto de las sub-regiones, en el caso de la sierra y el pedemonte, la proporción de la fracción estable es mayor al de la pasiva y disminuye con el incremento en el contenido

de arcilla + limo, llegando a igualarse a valores elevados. En el caso de la llanura medanosa, el C estable disminuye abruptamente a valores altos de arcilla + limo hasta alcanzar proporciones extremadamente bajas (< 5 %), produciendo un incremento relativo de la fracción pasiva (Figura 6.11). Cabe aclarar que los sitios de muestreo con valores de arcilla + limo más altos corresponden a las situaciones más alteradas antópicamente, por lo que probablemente la disminución relativa de la fracción estable de la materia orgánica edáfica esté indicando un profundo estado de degradación y pérdida de calidad de estos suelos.

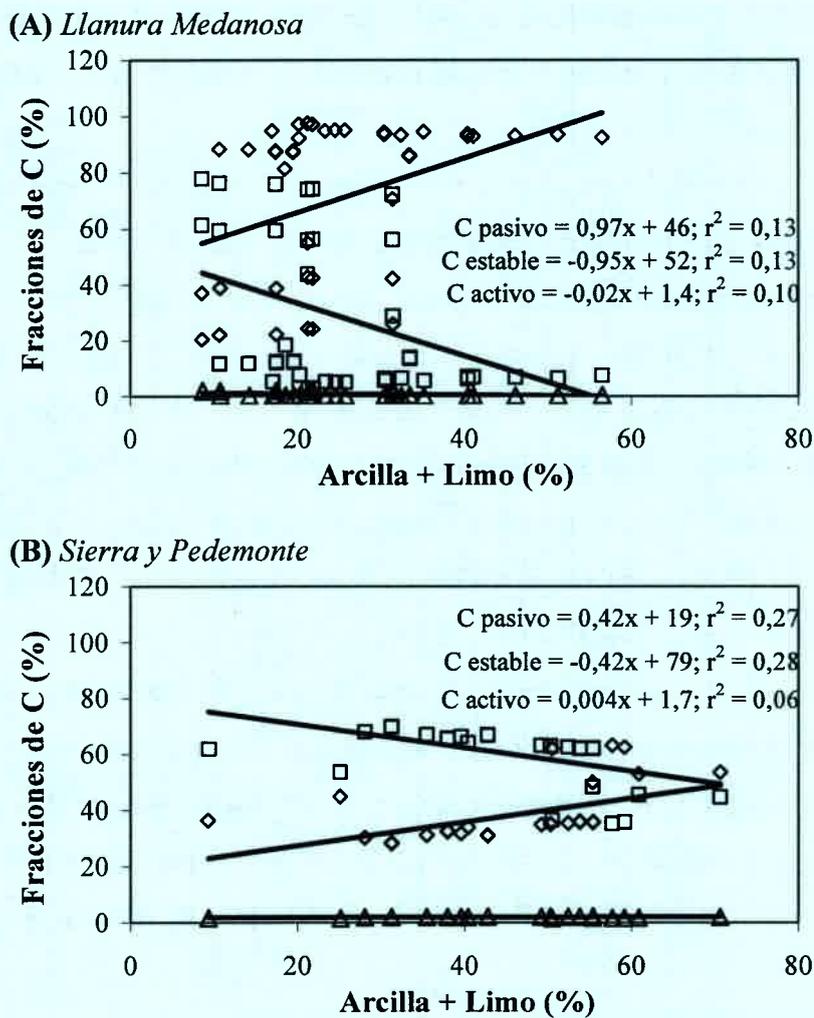


Figura 6.11: Relación entre el contenido de Arcilla + Limo (%) y la proporción relativa de las diferentes fracciones de C orgánico (%) en los horizontes superficiales de los suelos de la llanura medanosa (A) de la sierra y el pedemonte (B). C pasivo (rombos), C estable (cuadrados) y C activo (triángulos).

En la Figura 6.12 se observa la relación entre el contenido de arcilla + limo (%) y la proporción relativa de las fracciones de C orgánico para las diferentes situaciones de uso y manejo de las tierras. La fracción pasiva presenta una relación positiva con el incremento de arcilla + limo bajo las situaciones de monte y de pastizal, aunque con valores relativos diferentes, pasando aproximadamente de 20 a 40 % y de 40 a 60 % bajo monte y pastizal, respectivamente. Bajo uso agrícola la fracción pasiva presenta valores relativos mucho más altos y disminuye aproximadamente de 90 a 70 % con el incremento de la arcilla + limo.

La fracción estable de C muestra relaciones inversas a la pasiva, llegando bajo situación de pastizal, a presentar menor proporción relativa para altos niveles de arcilla + limo. En las tres situaciones de uso de la tierra la fracción activa presenta muy baja proporción para todo el rango de contenidos de arcilla + limo de los suelos analizados. Aunque por una cuestión de escala no se llega a ver claramente, la misma se incrementa desde valores entre el 1,5 y 2 % para bajos niveles de arcilla + limo, hasta valores cercanos al 3 % para altos niveles en las situaciones de monte y pastizal.

En cambio, bajo situación de uso agrícola incrementa desde 0,25 a 0,50 %. Si bien estos valores son de escasa magnitud, representan una duplicación de su proporción relativa, y en consecuencia un posible efecto sobre algunas propiedades del suelo y procesos que se producen en él, como el ciclado de nutrientes.

Por otra parte, el C orgánico de los suelos de la región bajo estudio presenta un gradiente de variación muy amplio, como consecuencia de pertenecer a diferentes unidades geomorfológicas, con distintos tipos de relieves, vegetación, condiciones climáticas y provenir de historias de usos y manejo de las tierras muy contrastantes entre sí. Por tal motivo, es conveniente analizar también la variación en el fraccionamiento del C orgánico edáfico a distintos niveles de C orgánico total.

Las tres fracciones de C simuladas por el modelo Century presentan una relación positiva con el contenido de C orgánico total, pero con pendientes de diferentes magnitudes (Figura 6.13A). Esto provoca que con el aumento en el contenido de C orgánico total cambien las proporciones relativas de cada una de las fracciones (Figura 6.13B).

La fracción activa del C parece ser la que menos se ve afectada por el contenido de C orgánico total, debido a su baja proporción relativa en todo el espectro de contenido de C total de los suelos bajo estudio. Aunque caben aquí las mismas

aclaraciones vertidas anteriormente, en cuanto a la importancia físico-química que representa pequeñas variaciones en el contenido de esta fracción.

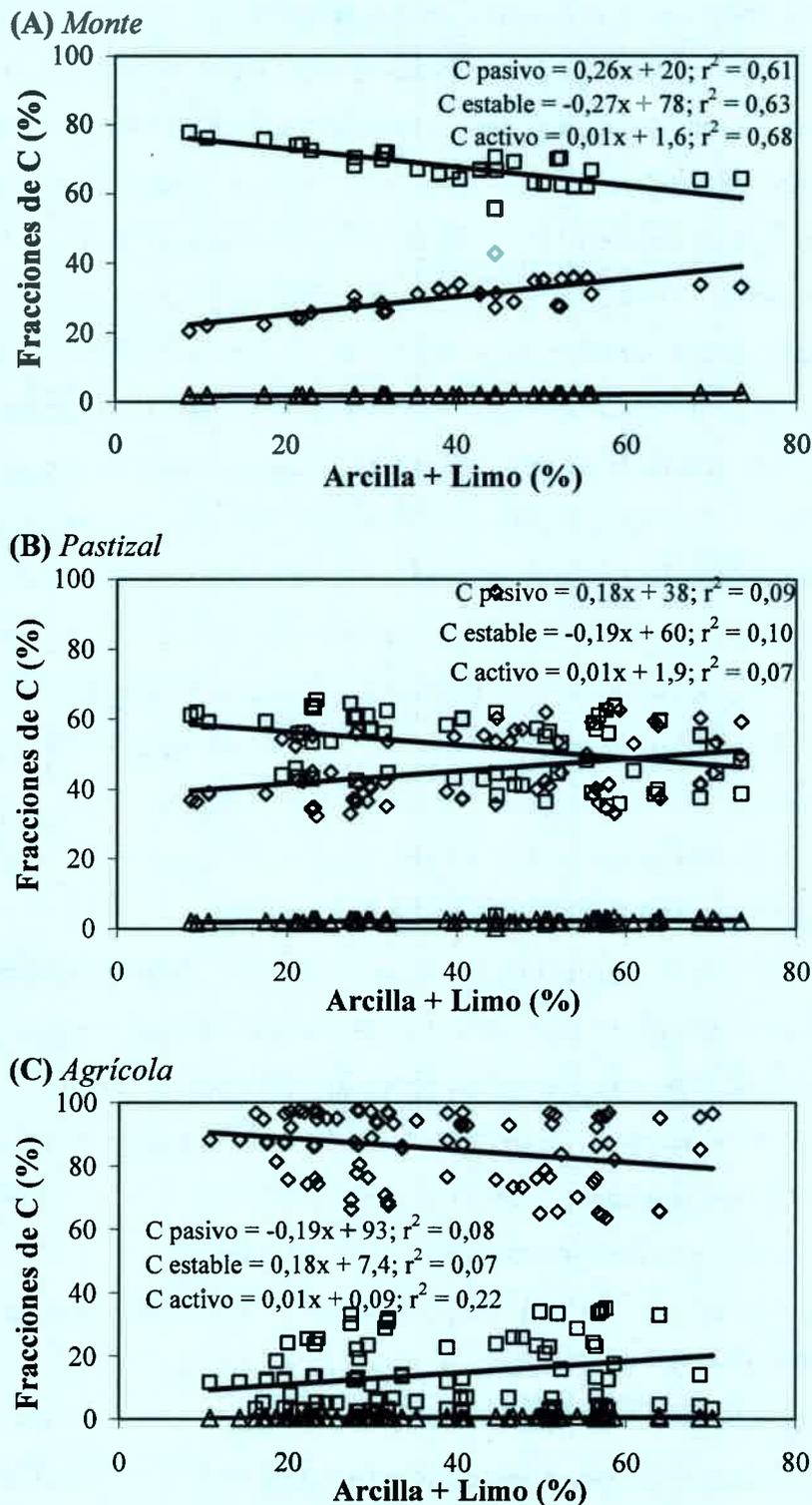


Figura 6.12: Relación entre el contenido de Arcilla + Limo (%) y la proporción relativa de las diferentes fracciones de C orgánico (%) en los horizontes superficiales de los suelos bajo situación de monte (A), de pastizal (B) y agrícola (C). C pasivo (rombos), C estable (cuadrados) y C activo (triángulos).

Los suelos con bajos niveles de C orgánico total presentan mayor proporción de la fracción pasiva de C que de la fracción estable, probablemente porque estos suelos corresponden a los ubicados en las llanuras medanosas con mayores contenidos en arenas y/o son los más alterados antrópicamente. Esta fracción es la que se encuentra más fuertemente protegida y estabilizada, y esto es lo que le permite incrementar su proporción relativa en situaciones de gran alteración (Figura 6.13).

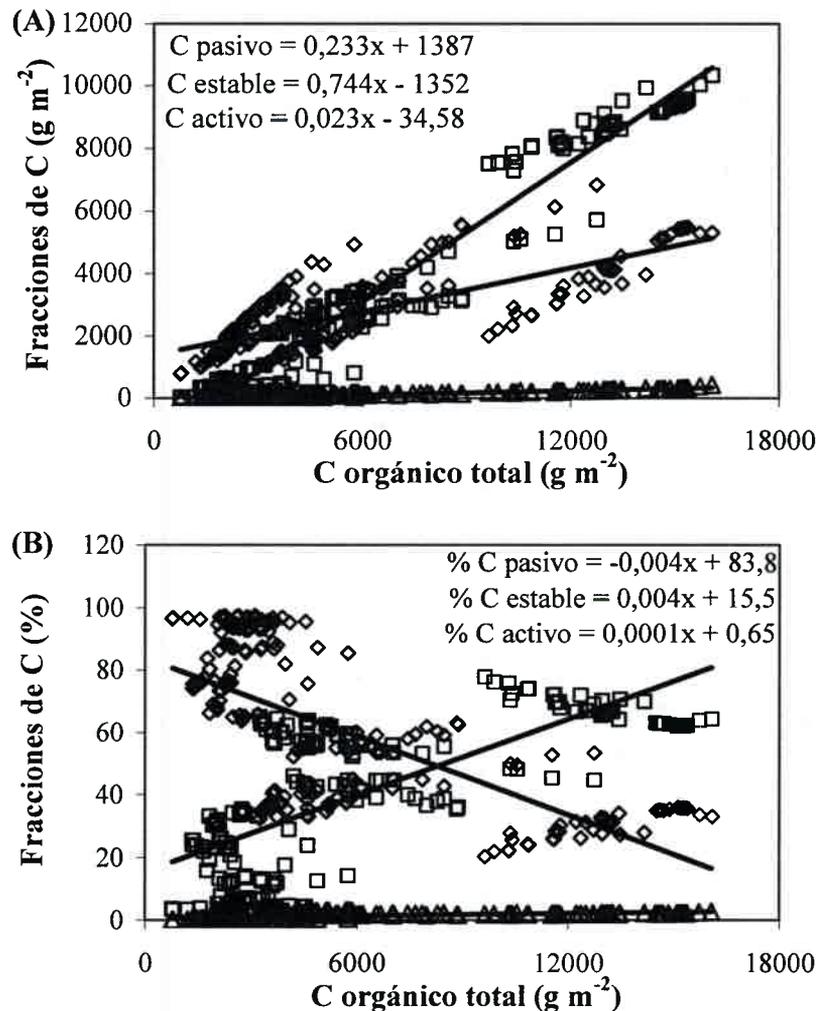


Figura 6.13: Relación entre el contenido de C orgánico total (%) y las diferentes fracciones de C orgánico expresadas en términos absolutos (A) y en términos relativos al contenido de C total (B) para los horizontes superficiales de los suelos de la región bajo estudio. C pasivo (rombos), C estable (cuadrados) y C activo (triángulos).

6.1.2 Gradiente climático

Otro aspecto que es necesario analizar por su importancia sobre la formación y evolución de la materia orgánica edáfica, es la influencia del factor climático. Aquí se hará referencia tanto a su acción directa, a través de los gradientes pluviométricos y térmicos de la región bajo estudio, como a su interacción con otros factores, como por ejemplo la vegetación y el uso de las tierras.

En la Figura 6.14 se presentan las relaciones existentes entre el contenido de C orgánico edáfico (%) y la temperatura máxima, mínima y media del aire, y la amplitud térmica resultante. Si bien con elevada variabilidad "vertical", producto de la existencia de muchos sitios de muestreo dentro del área de influencia de cada estación meteorológica, se observan claras relaciones entre el contenido de C y la temperatura. La cantidad de materia orgánica edáfica resulta, de manera muy simplificada, de un balance entre la humificación a partir de los restos orgánicos y la descomposición de la misma (oxidación/respiración), procesos en los que intervienen microorganismos, y por ende muy dependientes de las condiciones ambientales.

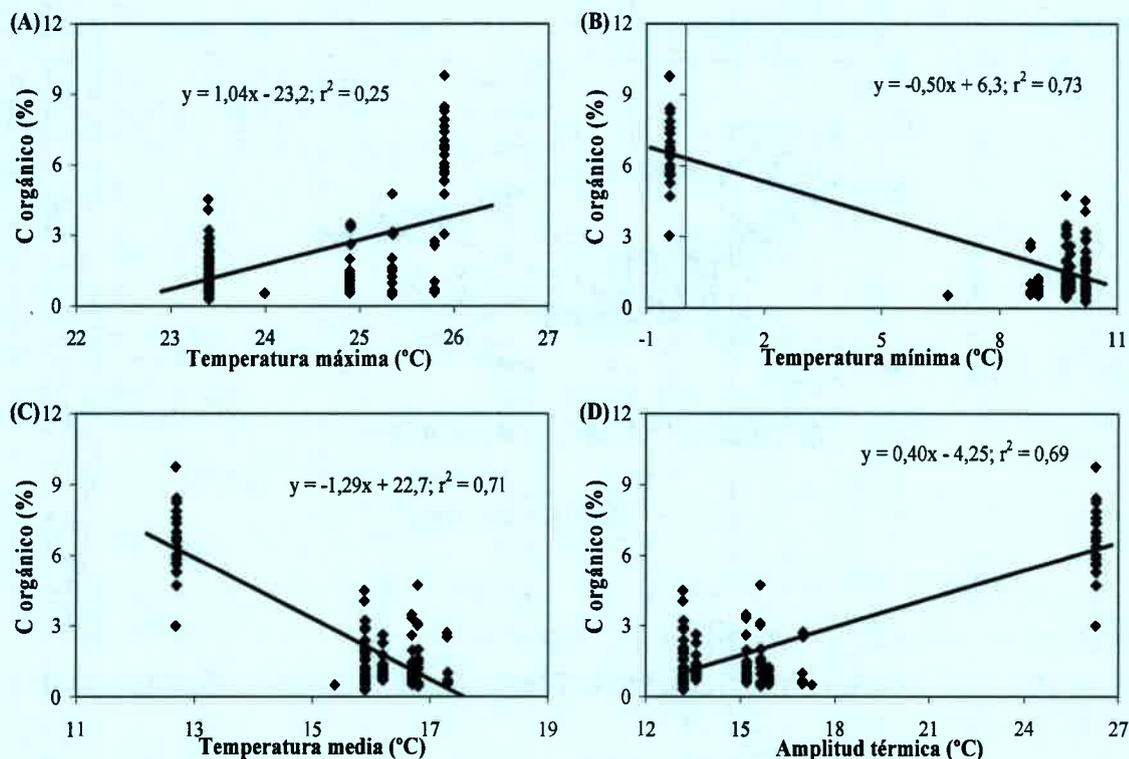


Figura 6.14: Relación entre el contenido de C orgánico de los horizontes superficiales de los suelos de la región bajo estudio y las temperaturas máxima (A), mínima (B) y media del aire (C), y la amplitud térmica (D).

El incremento en la temperatura máxima media del aire, dentro del rango de temperaturas consideradas aquí, favorece la acumulación de C orgánico en el suelo, aunque con bajo grado de ajuste. Sin embargo, las temperaturas mínima y media presentan una relación inversa, lo que estaría indicando que el principal factor que determina el incremento en el C orgánico edáfico, es la amplitud térmica, con mejor nivel de ajuste que la temperatura máxima.

En la Figura 6.14 se observan conjuntos de puntos claramente diferenciados entre sí, que corresponden a distintas estaciones meteorológicas ubicadas en regiones agroecológicas muy contrastantes. Los puntos que presentan menores valores en las temperaturas mínimas y con la mayor amplitud térmica resultante, corresponden a los suelos de la sierra y el pedemonte, por lo que el efecto de las temperaturas sobre el contenido de C orgánico podría estar interactuando con otras variables como altitud, pluviometría, granulometría, tipo de vegetación y uso de las tierras. Algunas de estas interacciones serán analizadas más adelante.

Corresponde hacer la misma aclaración para el caso de la relación entre la precipitación anual y el contenido de C orgánico (%) presentada en la Figura 6.15. En la misma se observa una relación positiva pero con bajo grado de ajuste general.

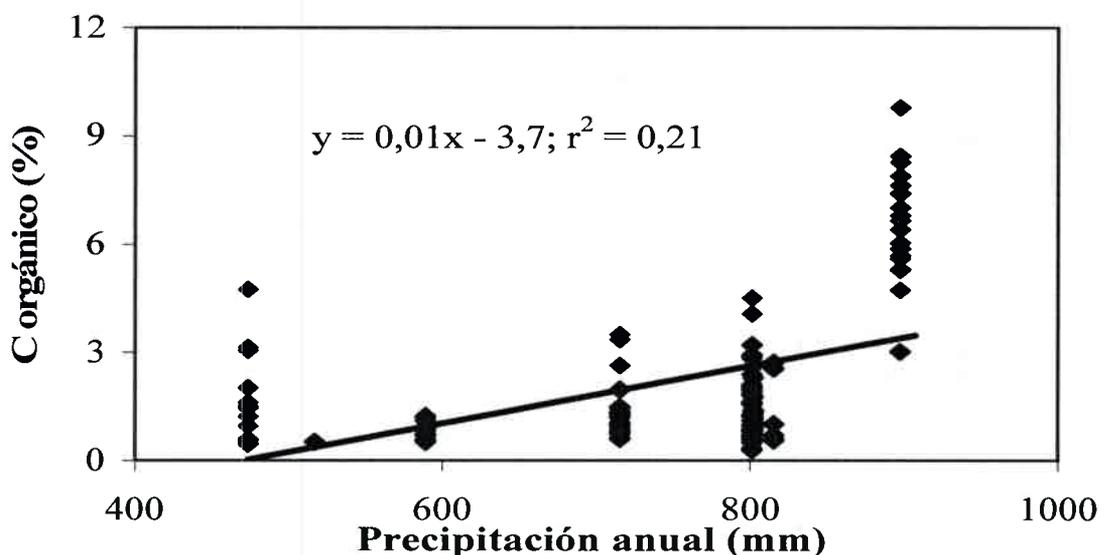


Figura 6.15: Relación entre el contenido de C orgánico (%) de los horizontes superficiales de los suelos de la región bajo estudio y la precipitación anual (mm).

En la Figura 6.15 se considera la precipitación anual promedio de una serie histórica de alrededor de 30 años, y no se tiene en cuenta la variabilidad interanual que

se presenta cada uno de los sitios de muestreo. Por otra parte, la precipitación presenta una errática distribución espacial, pudiendo variar muy intensamente entre sitios ubicados a escasa distancia, efecto que no se presenta en el caso de las temperaturas, a excepción del caso de las sierra y el pedemonte donde la diferente exposición al sol y a los vientos predominantes puede generar grandes variaciones.

La escasa cantidad de estaciones meteorológicas en la región bajo estudio, y la imposibilidad de contar en todos los casos con datos pluviométricos locales en cada sitio de muestreo, lleva a la necesidad de extrapolar los valores obtenidos en las diferentes estaciones. Estos factores podrían estar distorsionando la relación entre la pluviometría y el contenido de C orgánico.

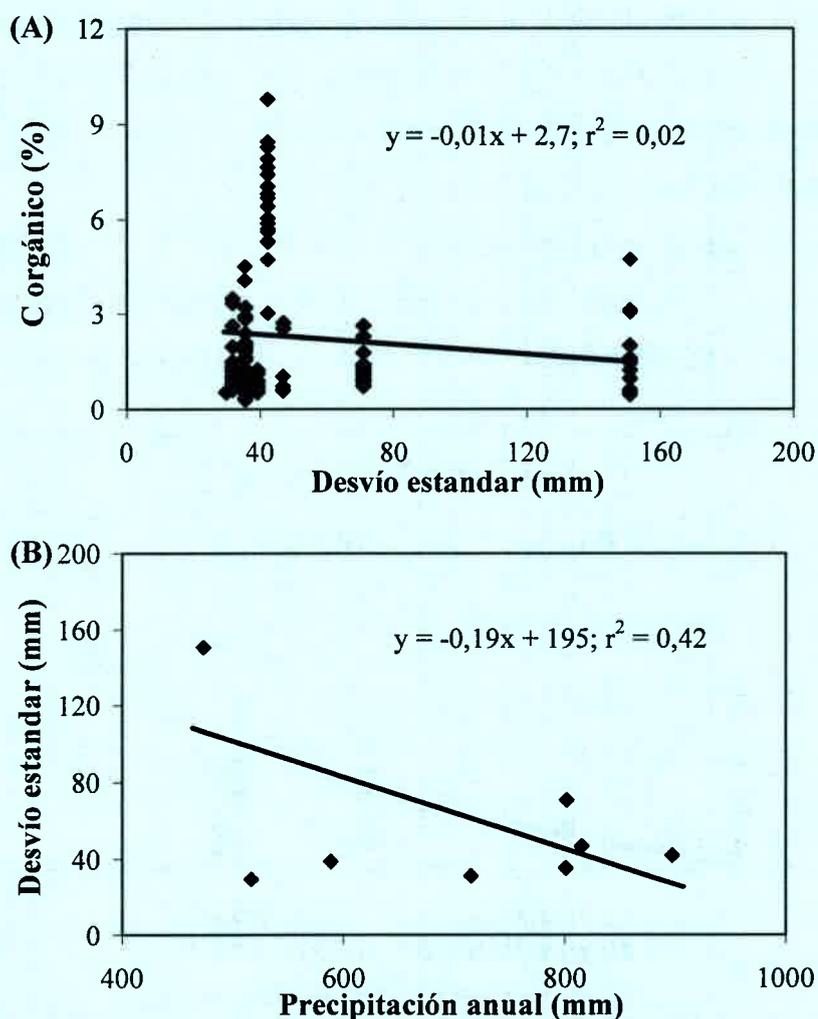


Figura 6.16: (A) Relación entre el contenido de C orgánico (%) de los horizontes superficiales de los suelos de la región bajo estudio y el desvío estandar de la precipitación anual (mm). (B) Relación entre el desvío estandar de la precipitación anual (mm) y la precipitación anual (mm).

El contenido de C orgánico no presentó relación con la magnitud de las variaciones interanuales en las precipitaciones, representadas aquí por el desvío estandar (Figura 6.16), justificando el bajo grado de ajuste observado en la figura 6.15. Las zonas más áridas, a su vez presentan la mayor variabilidad interanual de las lluvias, condicionando el crecimiento vegetal y el tipo de uso y manejo al que pueden ser sometidos.

El incremento en las temperaturas medias del aire aumenta la evapotranspiración y por consiguiente provoca o profundiza el déficit hídrico. Por este motivo, la relación entre las precipitaciones y la temperatura condiciona la actividad microbiana, el crecimiento vegetal y por ende, el contenido de C orgánico en el suelo (Figura 6.17).

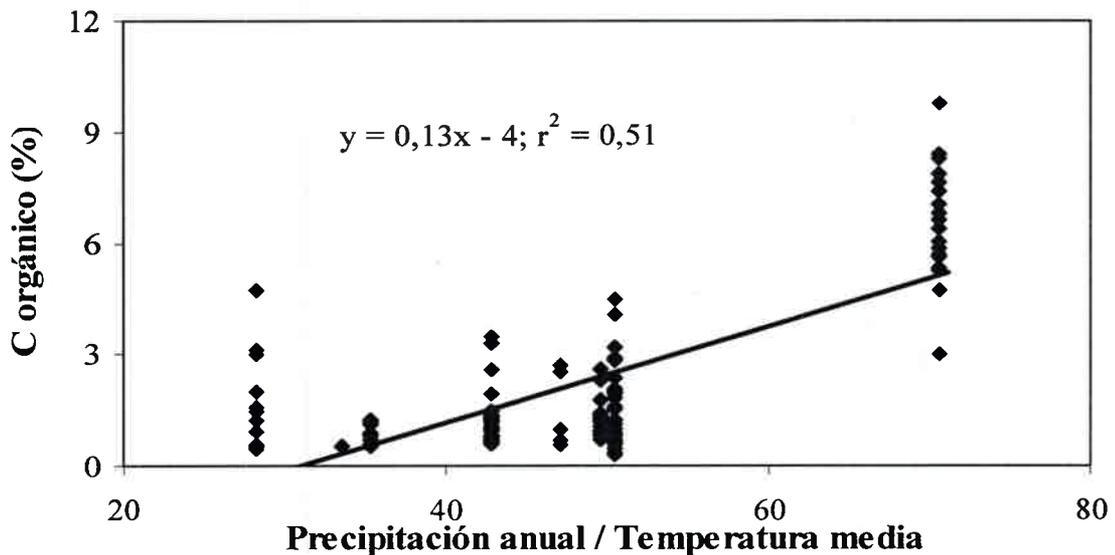


Figura 6.17: Variación del contenido de C orgánico (%) de los horizontes superficiales de los suelos de la región bajo estudio en función de la relación entre la precipitación anual (mm) y la temperatura media del aire (°C).

Como fue mencionado anteriormente, las variables climáticas interactúan entre sí y con otros factores ambientales y de manejo, pudiendo generar efectos muy disímiles sobre el contenido de C orgánico de los suelos de la región bajo estudio.

En la Figura 6.18 se observa la variación en el contenido de C orgánico edáfico en función de la altura sobre el nivel del mar. En la misma se distinguen tres grupos de observaciones: un grupo correspondiente a altitudes menores a los 500 msnm, otro entre los 800 y 900 msnm, y un tercer grupo correspondiente a altitudes mayores a los 1200 msnm.

El primer grupo corresponde a los sitios de muestreo ubicados en las llanuras mal drenadas, medanosas y a casi la totalidad de las observaciones de las llanuras bien drenadas. El segundo grupo corresponde a algunos sitios de las llanuras bien drenadas (ubicados en el sector fuertemente ondulado), y el tercero de ellos corresponde a las observaciones en la sierra y el pedemonte.

En ninguno de los sub-grupos de puntos se observa con claridad ningún patrón de variación del C orgánico respecto a la altitud. Esta distribución de las observaciones implica que el ajuste encontrado en la recta de regresión de la Figura 6.18, corresponde más a diferentes condiciones agroecológicas y/o de uso y manejo de las tierras, que al efecto de la altura sobre el nivel del mar.

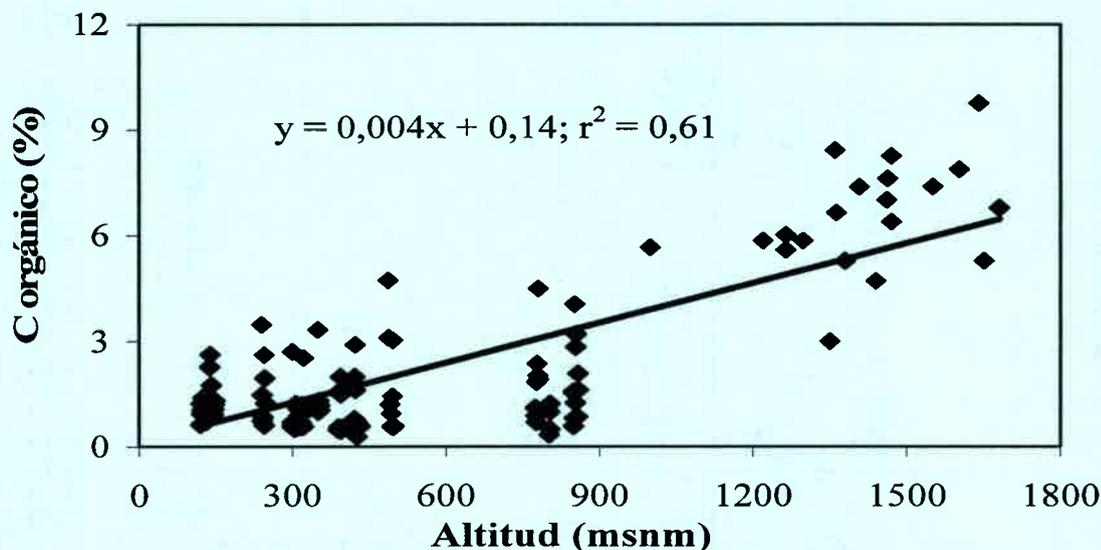


Figura 6.18: Relación entre la altitud (msnm) y el contenido de C orgánico (%) en los horizontes superficiales de los suelos de la región bajo estudio.

Al analizar el efecto de la altitud sobre el contenido de C orgánico edáfico, no habría que considerarla en forma aislado sino a través de su integración con otras variables asociadas, como por ejemplo las temperaturas y las precipitaciones (Figura 6.19).

En esta figura se puede observar que a mayor altitud se mantiene prácticamente constante la temperatura máxima media del aire pero disminuye la temperatura mínima media, generando un incremento de la amplitud térmica. Por otra parte, el aumento en la altura sobre el nivel del mar también produce un incremento en las precipitaciones medias anuales (Figura 6.19). La acción conjunta de estas dos relaciones podría

explicar, al menos en parte, la mayor acumulación de C orgánico observada en los suelos ubicados a mayor altura.

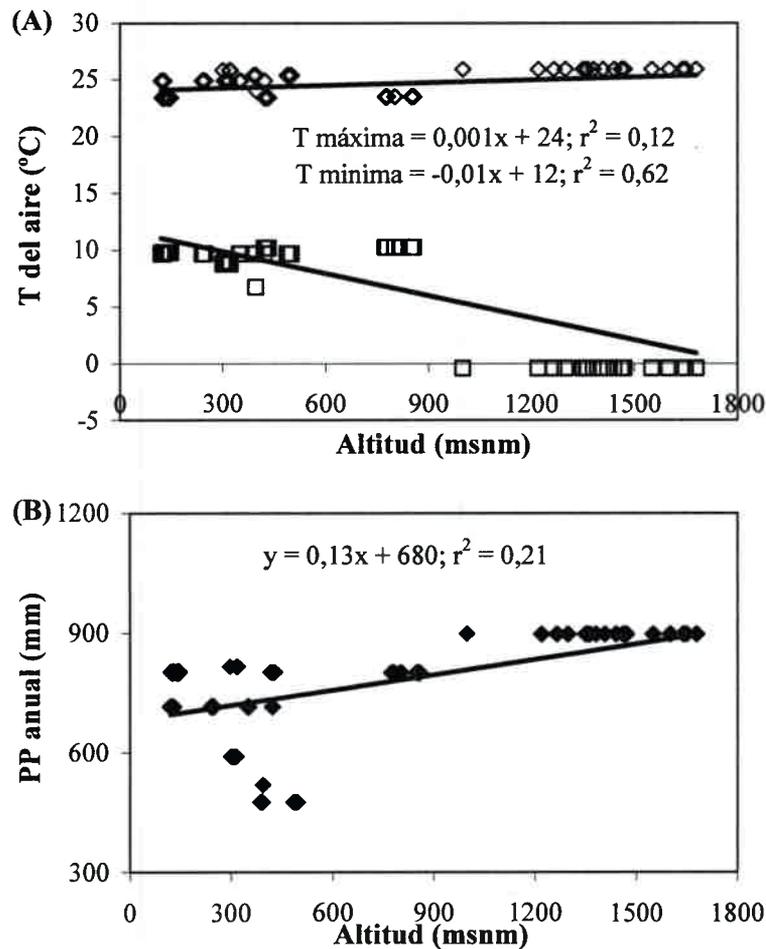


Figura 6.19: Relación entre la altitud (msnm), las temperaturas máximas y mínimas medias del aire (A) y las precipitaciones anuales (B).

6.1.3 Relación con algunas propiedades del suelo

El análisis de la dinámica de la materia orgánica edáfica, como indicador de la sustentabilidad de un agrosistema, se basa en que ésta representa una variable integradora de las propiedades que hacen a la calidad y salud del suelo. La cantidad y calidad de la materia orgánica edáfica determinan las propiedades físicas y químicas del suelo, condicionado la actividad de los microorganismos que habitan en él.

En esta sección se analizan por un lado, algunas propiedades del suelo que ejercen cierta influencia sobre la cantidad de materia orgánica edáfica y por otro, propiedades relacionadas con el contenido de C orgánico que hacen a la calidad del

suelo, como la densidad aparente que a su vez determina la porosidad y en parte la capacidad de retención hídrica, el contenido de nutrientes haciendo hincapié en el N, y la relación C/N como indicadora de la calidad y estabilidad de la materia orgánica edáfica.

En la Figura 6.20 se observa la relación entre la profundidad del solum y el contenido porcentual de C orgánico de los suelos de las diferentes sub-regiones. La profundidad del solum es una propiedad que condiciona por un lado la acumulación de agua en el perfil, y por el otro la exploración radical para la absorción de agua y nutrientes por parte de la vegetación. Esto hace presuponer que la mayor profundidad del mismo permite un mayor crecimiento vegetal que redundaría en un incremento del C orgánico edáfico. Esta relación sólo se presenta en las sub-regiones de la llanura bien drenada y de la sierra y el pedemonte (Figura 6.20).

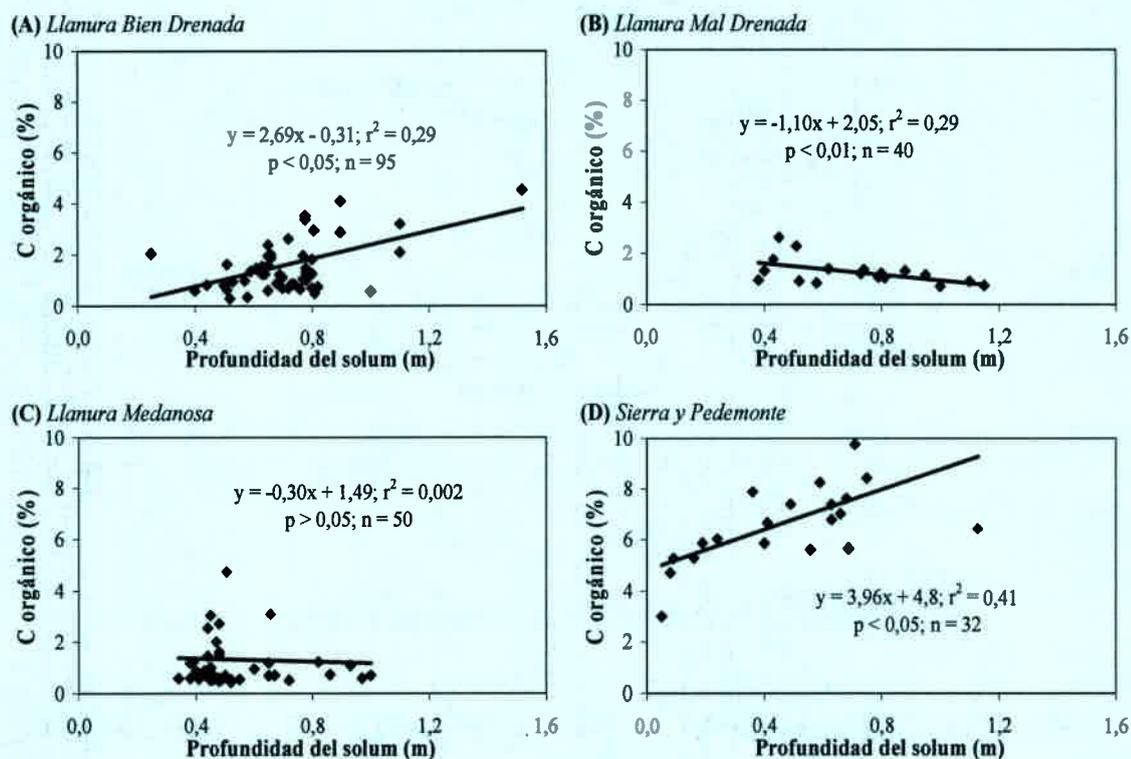


Figura 6.20: Relación entre la profundidad del solum y el porcentual de C orgánico de los horizontes superficiales de los suelos de la llanura bien drenada (A), de la llanura mal drenada (B), de la llanura medanosa (C) y de la sierra y el pedemonte.

En la llanura medanosa no se observa variación en el contenido de C orgánico con el aumento de la profundidad del solum, pero esto se debe a que los sitios de muestreo que presentan mayor profundidad del solum coinciden con las situaciones bajo

uso agrícola. En la llanura mal drenada el contenido de C orgánico presenta una relación negativa con la profundidad del solum. Esto podría deberse a la interferencia que producen las condiciones de intrazonalidad de los sitios de muestreo de esta sub-región, con presencia de la napa freática de elevado contenido salino a escasa profundidad.

Otra propiedad que podría suponerse que ejerce influencia favorable sobre el crecimiento vegetal y por ende sobre la acumulación de C orgánico en el suelo, es la profundidad del horizonte superficial. Sin embargo, en la Figura 6.21 se observa una relación negativa entre la profundidad del epipedón y el contenido de C orgánico, aunque con un grado de ajuste general muy bajo. Una probable explicación de esta respuesta es que, como es sabido, el contenido de materia orgánica disminuye con la profundidad del suelo y al considerar mayor espesor del horizonte superficial, se produce un efecto de dilución de la misma.

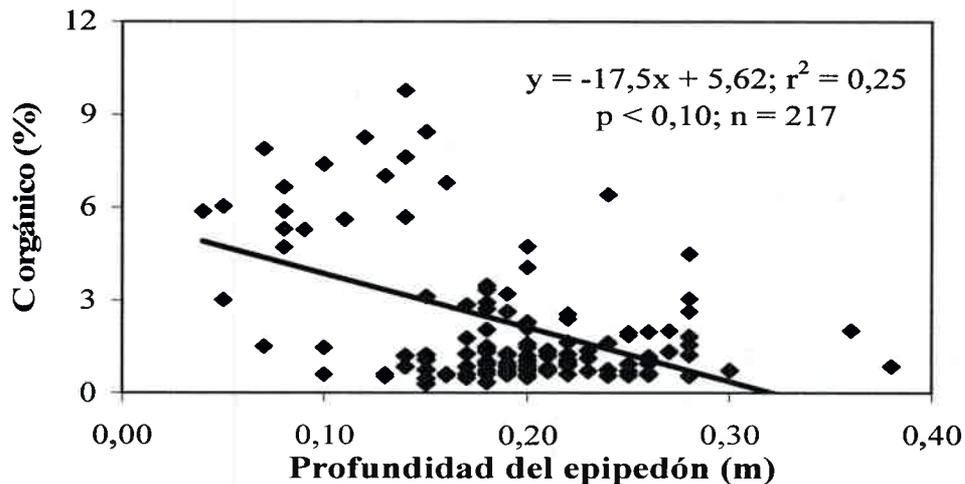


Figura 6.22: Relación entre la profundidad del epipedón y el porcentual de C orgánico de los horizontes superficiales de los suelos de la región bajo estudio.

Sin embargo, en los suelos de la sierra y pedemonte, la profundidad del epipedón tiene una relación positiva con el contenido de C orgánico (Figura 6.22A). Cabe aclarar que en esta sub-región fueron observados suelos que presentan horizontes superficiales con menos de 5 cm de espesor y con contacto lítico a muy escasa profundidad en muchos de esos casos. Por otra parte, esta sub-región se caracteriza por la presencia de pendientes topográficas muy fuertes que limitan la infiltración del agua de lluvia, generan procesos de erosión hídrica e impiden el normal desarrollo de la vegetación y del perfil del suelo.

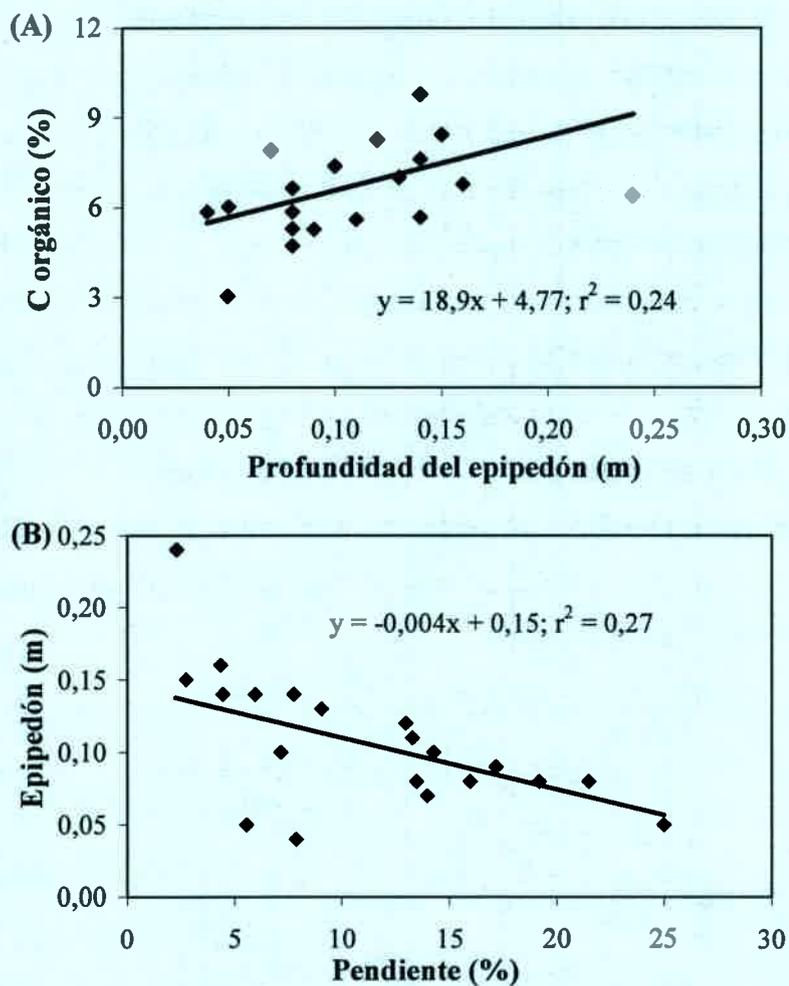


Figura 6.22: (A) Relación entre la profundidad del epipedón y el porcentual de C orgánico de los horizontes superficiales de los suelos de la sierra y el pedemonte. (B) Relación entre la pendiente media y la profundidad del epipedón de los suelos de la sierra y el pedemonte.

Estos procesos quedan demostrados con la relación observada entre la magnitud de la pendiente y el espesor del epipedón en los suelos de la sierra y pedemonte (Figura 6.22B), que a su vez, generan menor acumulación de C orgánico (Figura 6.23).

Desde el punto de vista de la evaluación de la calidad del suelo (y de la sustentabilidad del agrosistema), es importante cuantificar los rangos de variación de la densidad aparente del horizonte superficial bajo las diferentes condiciones agroecológicas e historias de uso y manejo de la región, y su relación con la materia orgánica edáfica como variable integradora de muchas propiedades y funciones que se cumplen en el suelo. El valor de densidad aparente que presenta el suelo en un momento dado, es en parte determinado por el grado de estructuración, que a su vez define la geometría del espacio poroso (porosidad total y la distribución de tamaños de poros),

afectando la infiltración, la retención hídrica y las funciones bióticas del suelo (exploración radical, disponibilidad y ciclado de nutrientes, etc.).

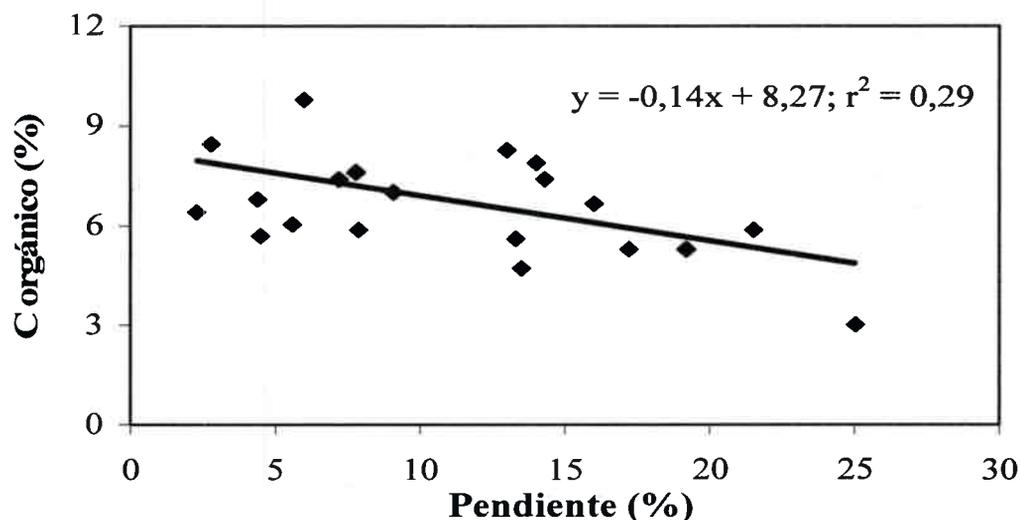


Figura 6.23: Relación entre la pendiente media y el contenido porcentual de C orgánico edáfico de los horizontes superficiales de los suelos de la sierra y el pedemonte.

La relación entre el contenido de C orgánico del horizonte superficial de los suelos de la región y su densidad aparente aparece representada en Figura 6.24 con un aceptable grado de ajuste general. La misma muestra una gran concentración de puntos con bajos niveles de C orgánico y elevados valores de densidad aparente, y un aumento en la dispersión de los valores a mayores niveles de C orgánico. Esta figura presenta un amplio rango de variación en los valores de C orgánico y densidad aparente porque integra valores de suelos de distintas sub-regiones y con diferentes historias de uso y manejo.

En la Figura 6.25 se discriminan las observaciones de acuerdo a la sub-región a la que pertenecen, y en la Figura 6.26 se lo hace en función de la historia de uso y manejo del suelo. La diferenciación entre las distintas sub-regiones no mejora el nivel de ajuste de las rectas de regresión y sólo acota el rango de variación que presentan los valores de densidad aparente y C orgánico en cada una de ellas. En cambio, la discriminación según historias de uso y manejo permite diferenciar distintos tipos de respuestas. Por un lado, una mejora en el grado de ajuste en el grupo de las observaciones pertenecientes a los sitios de muestreo bajo situación de monte y pastizal –con gran proporción de C particulado–, que presentan una respuesta semejante entre sí, aunque con pequeñas diferencias en las pendientes de las rectas de regresión. Por otro

lado, el grupo de observaciones correspondientes a los sitios bajo uso agrícola, que presenta un rango de variación de los valores muy estrecho y no muestra una relación clara entre el contenido de C orgánico y la densidad aparente del suelo.

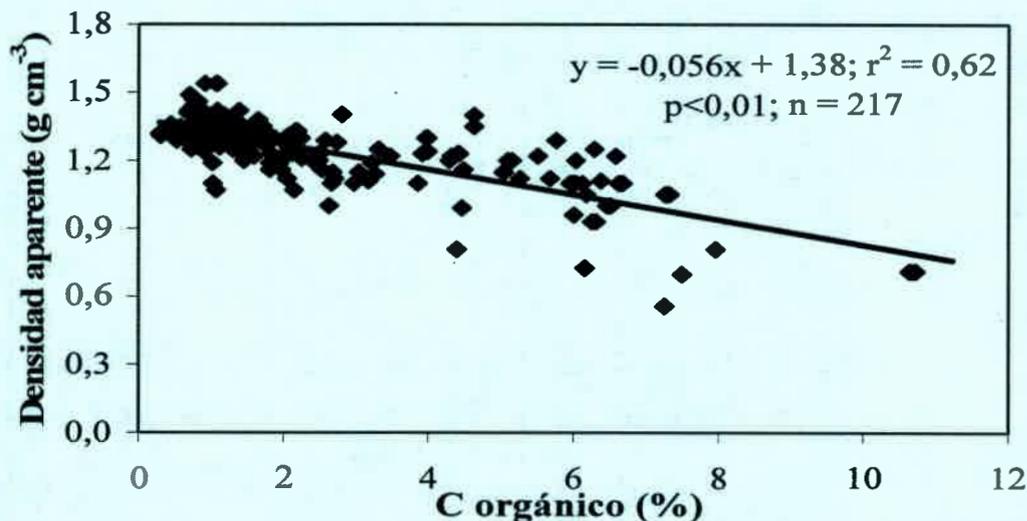


Figura 6.24: Relación entre el contenido porcentual de C orgánico y la densidad aparente de los horizontes superficiales de los suelos de la región bajo estudio.

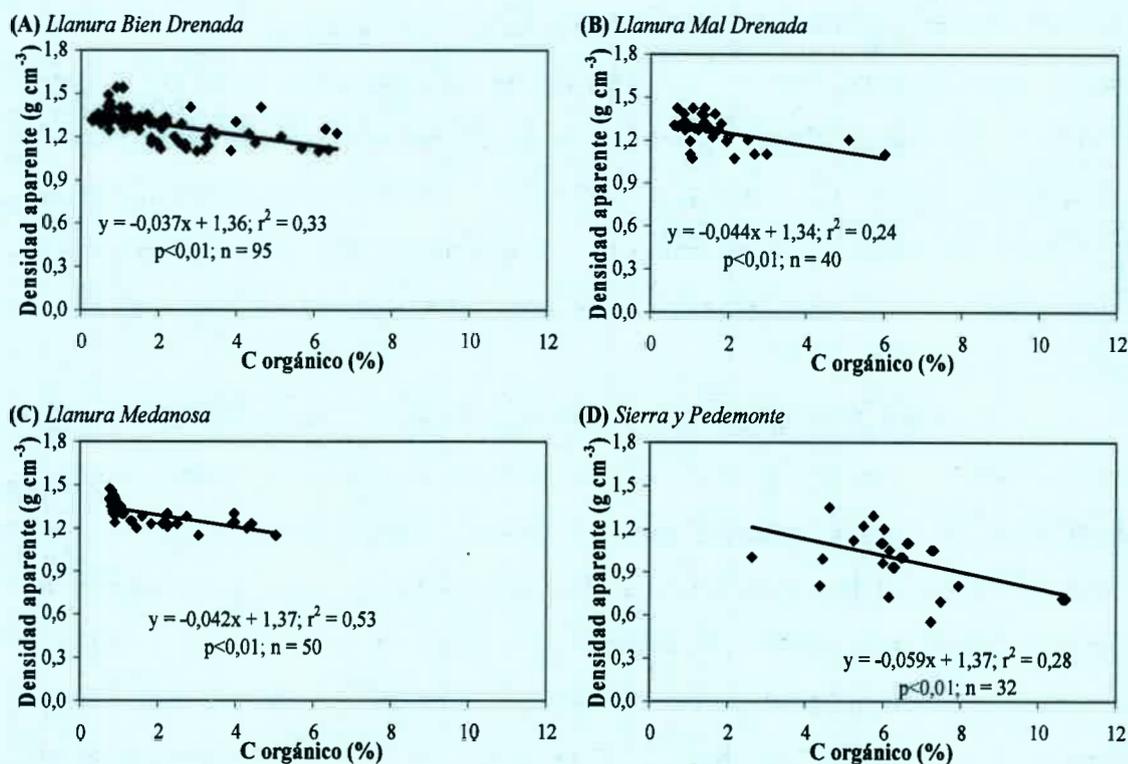


Figura 6.25: Relación entre el contenido porcentual de C orgánico y la densidad aparente de los horizontes superficiales de los suelos de la llanura bien drenada (A), de la llanura mal drenada (B), de la llanura medanosa (C) y de la sierra y el pedemonte (D).

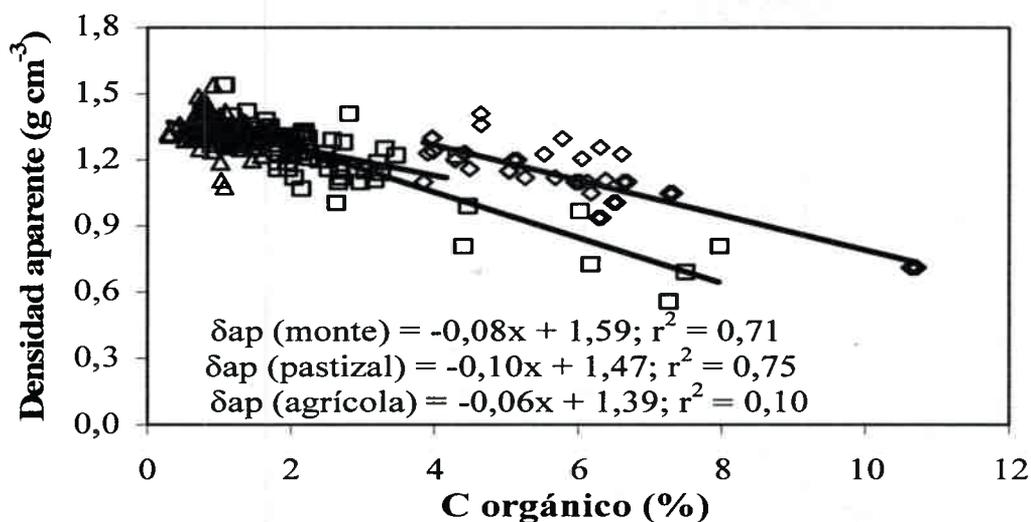


Figura 6.26: Relación entre el contenido porcentual de C orgánico y la densidad aparente de los horizontes superficiales de los suelos de la región bajo situación de monte (rombos), de pastizal (cuadrados) y de uso agrícola (triángulos).

Como fue mencionado anteriormente, la materia orgánica edáfica ejerce acción sobre las propiedades físicas y químicas del suelo. Un aspecto importante de ser analizado respecto de esta última, es el efecto que los diferentes sistemas de uso y manejo de las tierras podrían tener sobre la disponibilidad de nutrientes.

En la Figura 6.27 se presenta la relación existente entre los contenidos porcentuales de C orgánico y de N total en los horizontes superficiales, discriminando las observaciones según el tipo de uso actual que presenten los sitios de muestreo. En la misma se observa la relación positiva entre ambas variables con muy buen grado de ajuste general. La relación encontrada concuerda con lo reportado por diferentes autores (Tittonell, 2004; Álvarez, 2006; Galantini *et al.*, 2007; Galantini, 2008). El patrón de distribución que presentan las observaciones correspondientes a los diferentes tipos de uso y manejo de las tierras, no parece demostrar que el tipo de relación existente entre ambas variables se vea afectado.

La relación C/N de la materia orgánica de los horizontes superficiales de los suelos de la región bajo estudio presenta una relación positiva con el contenido de C orgánico total, pero con una gran dispersión de valores (Figura 6.28A). La relación C/N de la materia orgánica está determinada por la calidad de los restos orgánicos, principalmente por contenido de lignina de la vegetación, y por el grado de evolución/estabilización alcanzado por la materia orgánica como resultado de la

interacción entre los microorganismos, el clima y las propiedades del suelo (Álvarez, 2006).

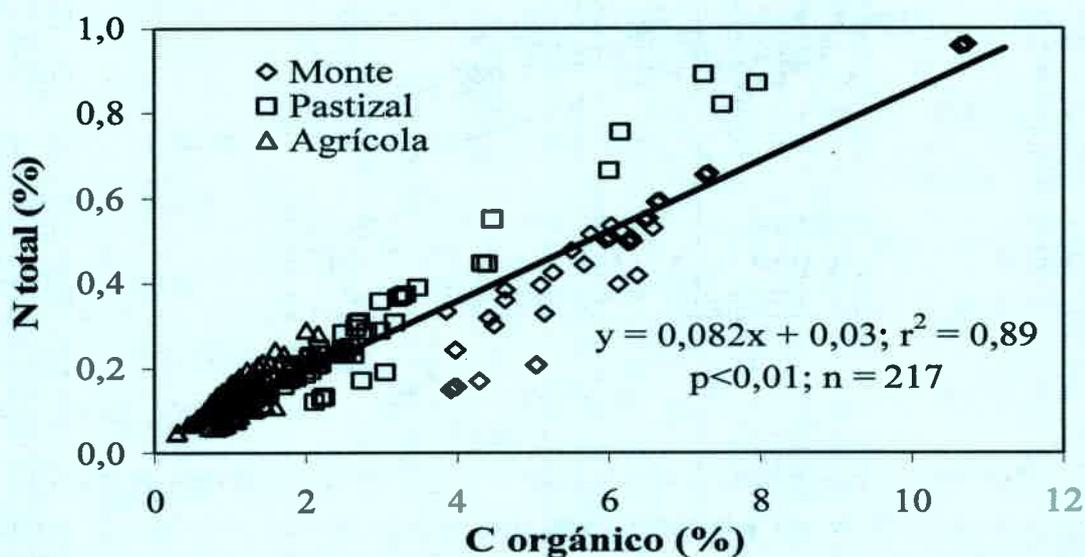


Figura 6.27: Relación entre los contenidos porcentuales de C orgánico y N total de los horizontes superficiales de los suelos de la región bajo situación de monte (A), de pastizal (B) y de uso agrícola.

En la parte B de la Figura 6.28 se presentan los valores de la relación C/N en función del contenido de C orgánico, discriminando las observaciones correspondientes a los diferentes tipos de uso de la tierra. En el caso de los suelos bajo uso agrícola o pastizal la relación C/N no presenta variación con el aumento en el contenido de C orgánico. En cambio, para la situación de monte la relación es negativa, presentando valores de C/N extremadamente elevados a niveles medios de C orgánico, como consecuencia de la alta proporción de lignina contenida en este tipo de formación vegetal.

Para un análisis más exhaustivo de las relaciones entre la cantidad y calidad del C orgánico con otras propiedades que caracterizan la calidad y salud del suelo, ver lo expuesto Tiftonell (2004) en un trabajo complementario a este.

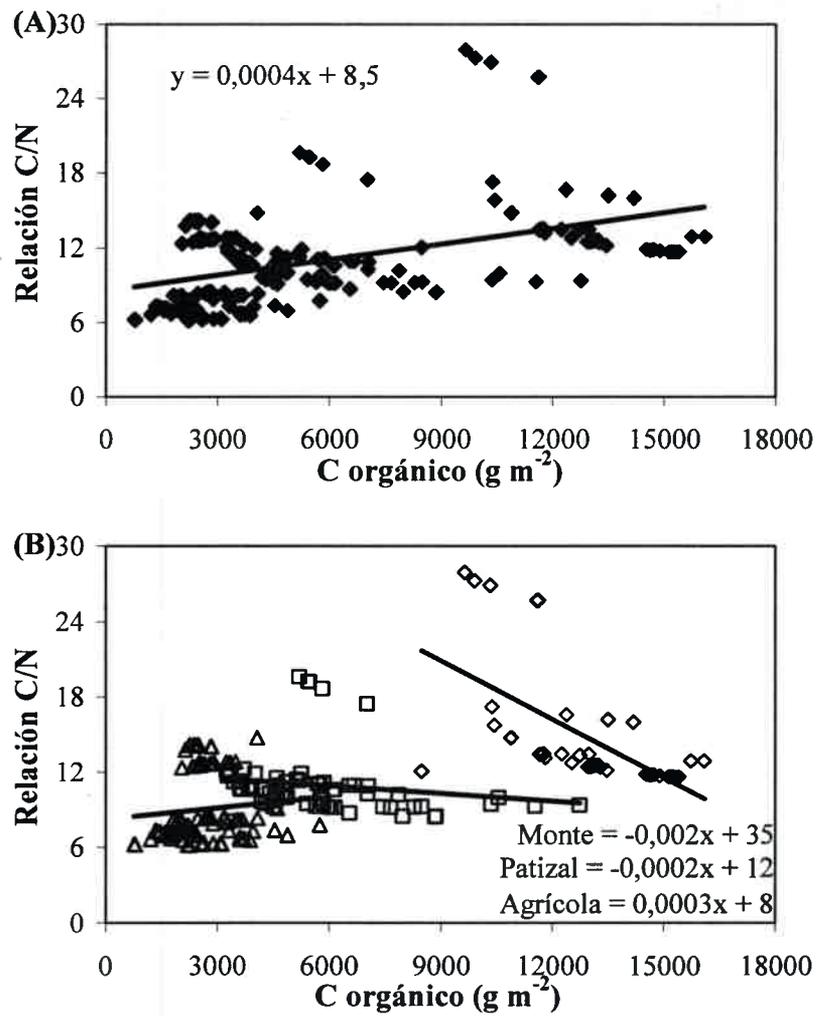


Figura 6.28: (A) Relación entre el contenido porcentual de C orgánico y la relación C/N de la materia orgánica de los horizontes superficiales de los suelos de la región bajo estudio. (B) Discriminado para las situaciones de monte (rombos), patizal (cuadrados) y uso agrícola (triángulos).

6.2 Grado de ajuste del modelo Century

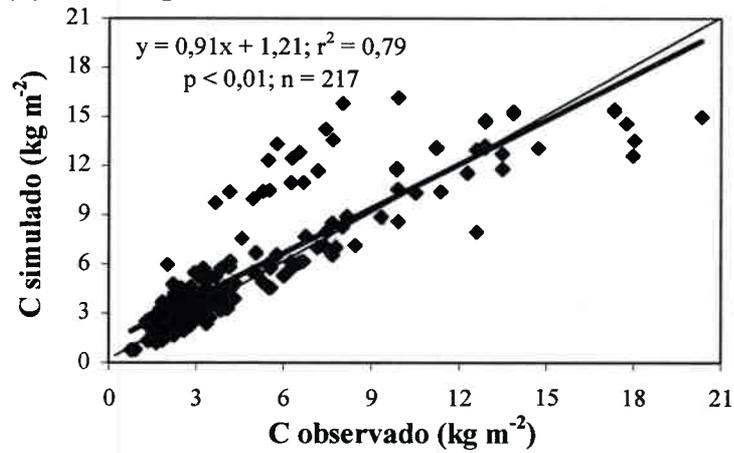
6.2.1 Grado de ajuste general para toda la región bajo estudio

En la Figura 6.29A se comparan los valores de C orgánico total observados y simulados por el Century para los horizontes superficiales de todos los puntos de muestreo considerados en esta tesis, independientemente de la sub-región considerada. De la figura se desprende claramente que el modelo Century presenta un grado de ajuste aceptable ($r^2 = 0,79$; $p < 0,01$) entre los valores simulados y observados de C orgánico total, para el amplio rango de condiciones consideradas (latitud, longitud, altitud, temperatura, precipitación, textura, posición en el relieve, drenaje, vegetación, uso y manejo), y para niveles de C que varían aproximadamente entre 0,5 y 21 kg m⁻³ de suelo, considerando hasta los 0,20 m de profundidad.

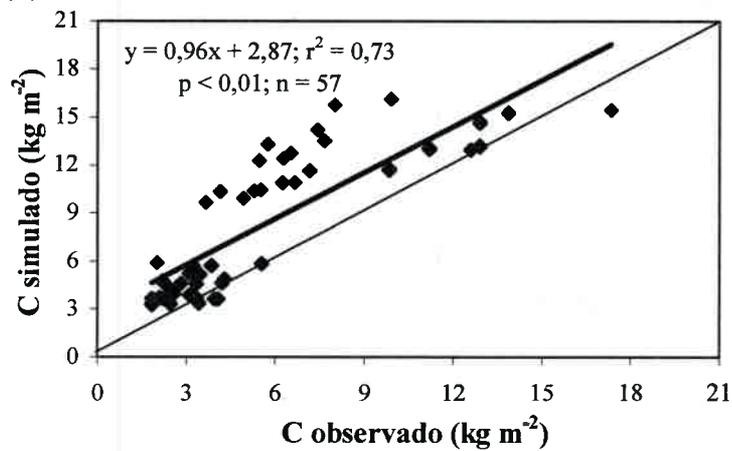
La recta de regresión lineal generada por el modelo cruza la recta de ajuste entre los valores observados y simulados en 13,5 kg C m⁻³, presentando una ligera sobre-estimación por debajo y una sub-estimación por encima de dicho valor de C observado. La distribución de los puntos en la figura indica que el modelo predice los valores de C más estrechamente para sitios con bajos niveles de C (C observado < a 4 kg m⁻³ aproximadamente) que para aquellos con elevados niveles.

Al tomar en cuenta sólo los puntos de muestreo considerados como en Condición Natural (sitios poco o nada alterados por la intervención antrópica – ver descripción en el capítulo anterior) se observa que si bien el modelo Century ajusta en forma aceptable ($r^2 = 0,73$ $p < 0,01$), sobre-estima el nivel de C en todo el rango de valores medidos (Figura 6.29B). Esto podría deberse a la dificultad de encontrar situaciones que realmente presenten nulo grado de alteración antrópica y a la imposibilidad de estimar fehacientemente el nivel de impacto generado por los herbívoros nativos sobre la biomasa vegetal producida. Por otra parte, para los puntos de muestreo considerados en Condición Actual (sitios con alteración antrópica bajo combinaciones particulares de los esquemas de manejos planteados en el capítulo anterior, en la Figura 6.29C se observa un muy buen grado de ajuste del modelo ($r^2 = 0,92$; $p < 0,01$), aunque presenta una leve sub-estimación del valor de C orgánico total para niveles de C observado mayores a 5 kg m⁻³ de suelo, y un aumento en la dispersión de los puntos para contenidos elevados de C.

(A) *Todos en general*



(B) *Condición natural*



(C) *Condición actual*

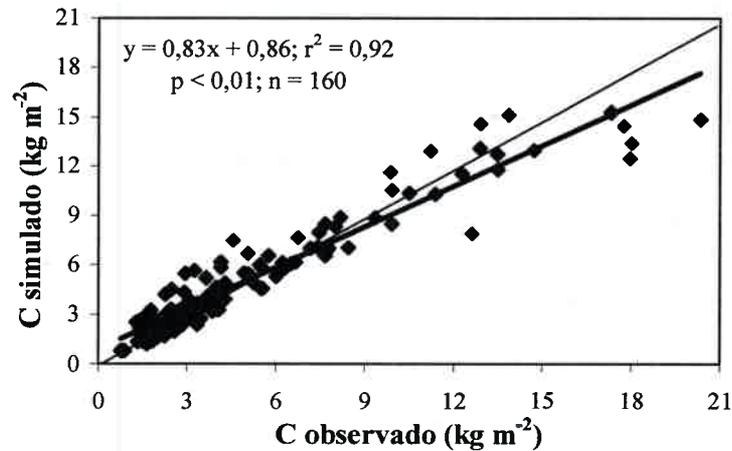
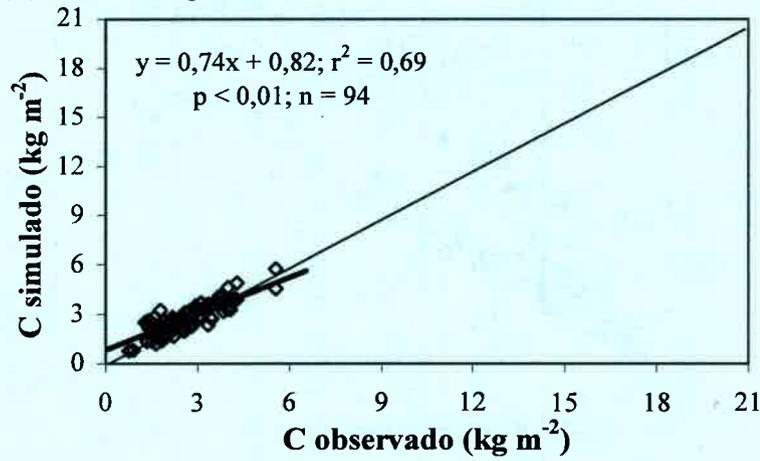
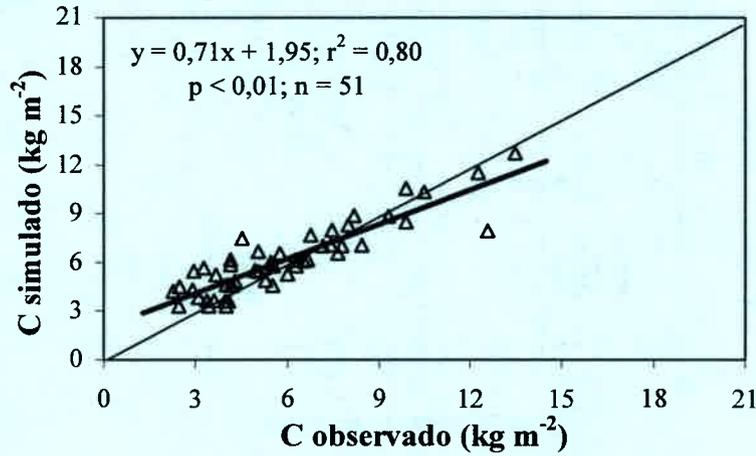


Figura 6.29: Comparación entre los valores de C orgánico total observados y simulados por el Century para los horizontes superficiales de todos los suelos muestreados en general (A), para los considerados en condición Natural (B) y para los considerados en condición actual (C).

(A) *Situación agrícola*



(B) *Situación de pastizal*



(C) *Situación de monte*

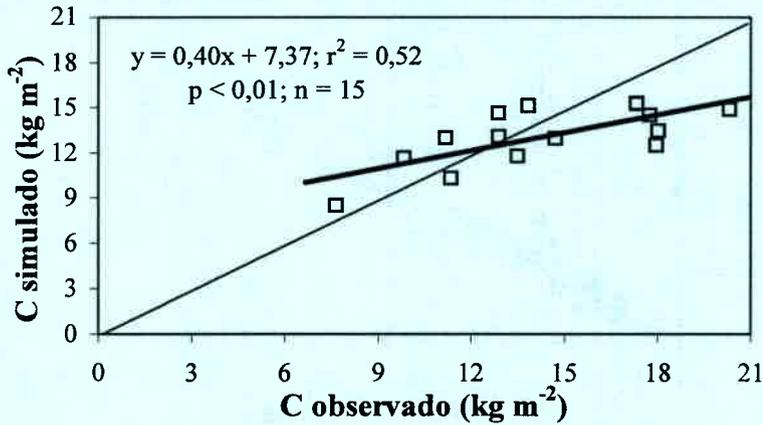


Figura 6.30: Comparación entre los valores de C orgánico total observados y simulados por el Century para los horizontes superficiales de todos los suelos muestreados bajo agricultura (A), bajo pastizal (B) y bajo monte (C).

Para intentar explicar el origen de este aumento en la dispersión de los puntos con altos niveles de C edáfico observado en la Figura 6.29C, se procedió a su desagregación de acuerdo al tipo de vegetación presente actualmente en cada sitio de muestreo (Figura 6.30). En la misma puede observarse que para las situaciones bajo monte, las simulaciones del Century presentaron menor grado de ajuste ($r^2 = 0,52$) con el contenido de C orgánico medido que para las situaciones bajo pastizal o agricultura ($r^2 = 0,80$ y $0,69$, respectivamente). Este hecho podría deberse a que en la confección de las simulaciones para las situaciones de monte existen fuentes de error de mayor importancia que para los otros tipos de formaciones vegetales (estimación de la cobertura, densidad, producción de biomasa, etc., sumadas a las posibles modificaciones generadas sobre las propiedades edáficas por parte del ganado que utiliza estos montes como lugares de descanso y/o reparo).

Para las situaciones bajo agricultura el modelo presentó un grado de ajuste bastante aceptable ($r^2 = 0,69$), considerando todas las fuentes de variación propias del uso agrícola (rotaciones, densidad, rendimiento, manejo de residuos de cosecha, etc.).

6.2.2 Grado de ajuste para las distintas sub-regiones

En la Figura 6.31 se comparan los valores de C orgánico total observados y simulados por el modelo Century de los horizontes superficiales para cada una de las sub-regiones estudiadas. Los mejores niveles de ajuste del modelo fueron observados para la Llanura Bien Drenada y la Medanosa ($r^2 = 0,68$; $p < 0,01$ y $r^2 = 0,71$; $p < 0,01$, respectivamente), en contraposición con los observados para la Llanura Mal Drenada y la Sierra y Pedemonte ($r^2 = 0,51$; $p < 0,01$ y $r^2 = 0,61$; $p < 0,01$, respectivamente). Esto coincide con lo reportado por Tittonell (2004) quien observó menores niveles de ajuste del modelo para condiciones de intrazonalidad, como la Llanura Mal Drenada y la Sierra y Pedemonte, que podrían estar afectando ciertos parámetros del modelo que no fueron considerados en su validación. En este sentido, cabe remarcar que el modelo Century fue desarrollado y validado en condiciones zonales ("Great Plains" del centro de los Estados Unidos).

Para la Llanura Bien Drenada el modelo predice en forma aceptable el valor de C orgánico total, aunque sobre-estima levemente en el rango de los niveles más altos de C encontrados en esta sub-región (Figura 6.31A). En el caso de la Llanura Medanosa, el

modelo sobre-estima en todo el rango de C observado (Figura 6.31C), probablemente debido a una no muy precisa ponderación de la proporción de la biomasa aportada por la vegetación arbórea y herbácea en el armado de las simulaciones cuando el tipo de formaciones vegetales en estado natural es de bosques o sabanas.

En la Llanura Mal Drenada y en la Sierra y Pedemonte, el modelo predice adecuadamente para la mayoría de los puntos de muestreo considerados, pero hay algunos casos que distan excesivamente de la recta de ajuste entre los valores observados y simulados (Figura 6.31B y D), llegando por ejemplo en la Llanura Mal Drenada, a simular valores de C que duplican al valor de C observado. Como se dijo anteriormente, esto podría deberse a que los parámetros del modelo no fueron validados para ciertas condiciones de intrazonalidad (pendiente, erosión, pedregosidad, anegamiento, salinidad, alcalinidad, presencia de capas de tosca, presencia de napa freática a escasa profundidad, etc.). Por otra parte, cabe destacar que el modelo predice en forma más estrecha para niveles bajos de C orgánico total dentro del rango observado en cada sub-región, y presenta menor ajuste a medida que los valores de C observado aumentan.

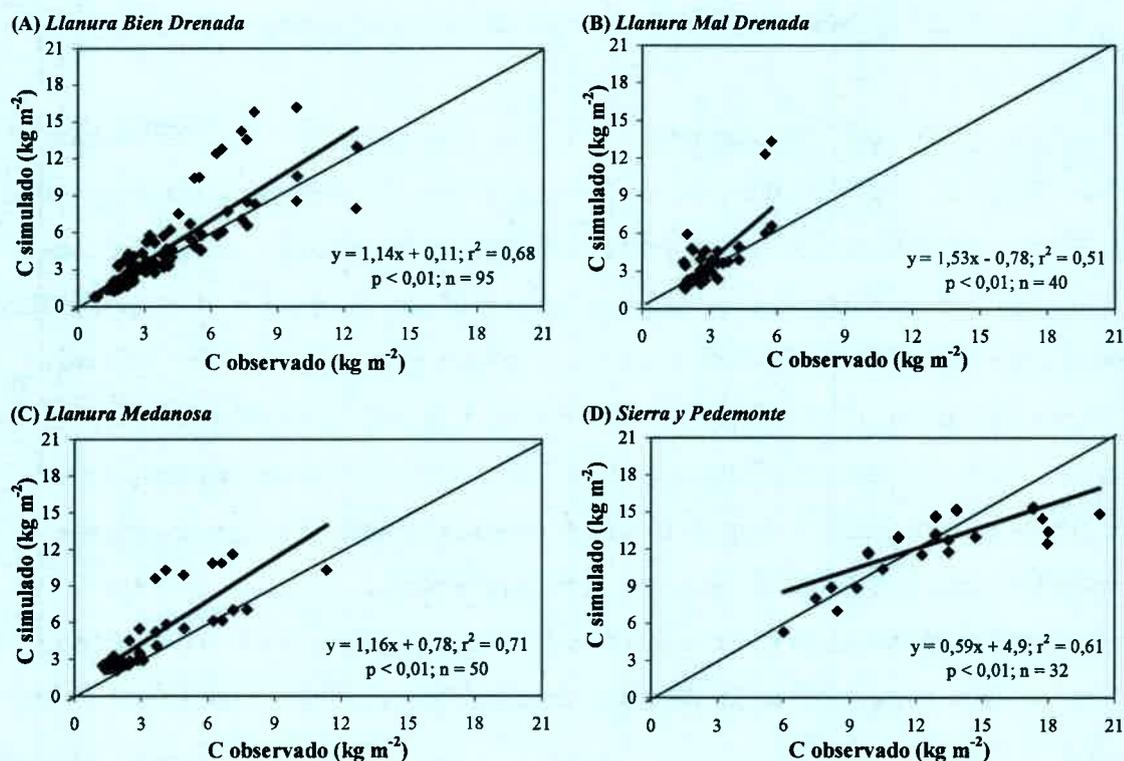


Figura 6.31: Comparación entre los valores de C orgánico total observados y simulados por el Century para los horizontes superficiales de los todos suelos muestreados en general de la llanura bien drenada (A), de la llanura mal drenada (B), de la llanura medanosa (C) y de la sierra y el pedemonte (D).

6.2.2.1 Grado de ajuste en condiciones naturales

Para las situaciones consideradas como naturales, el grado de ajuste del modelo es bueno en todas las sub-regiones estudiadas ($r^2 = 0,76$; $p < 0,01$, $r^2 = 0,70$; $p < 0,01$, $r^2 = 0,86$; $p < 0,01$ y $r^2 = 0,74$; $p < 0,01$, para la Llanura Bien Drenada, Mal Drenada, Medanosa y la Sierra y Pedemonte, respectivamente) (Figura 6.32). Sin embargo, a excepción de lo observado para la Sierra y el Pedemonte (Figura 6.32D) donde el modelo predice adecuadamente dentro del rango de valores de C medido en esta sub-región, en las restantes sub-regiones, el modelo sobre-estima el nivel de C orgánico total (Figura 6.32A, B y C). En las Llanuras Bien y Mal Drenadas sobre-estima para niveles altos de C observado, y en la Llanura Medanosa la sobre-estimación se produce en todo el rango de valores de C medido en esta sub-región, llegando a ser en algunos casos de más del doble. Como fue descrito anteriormente, esta desviación entre lo simulado y lo observado podría estar relacionada con el tipo de formación vegetal presente en esta sub-región en condiciones naturales.

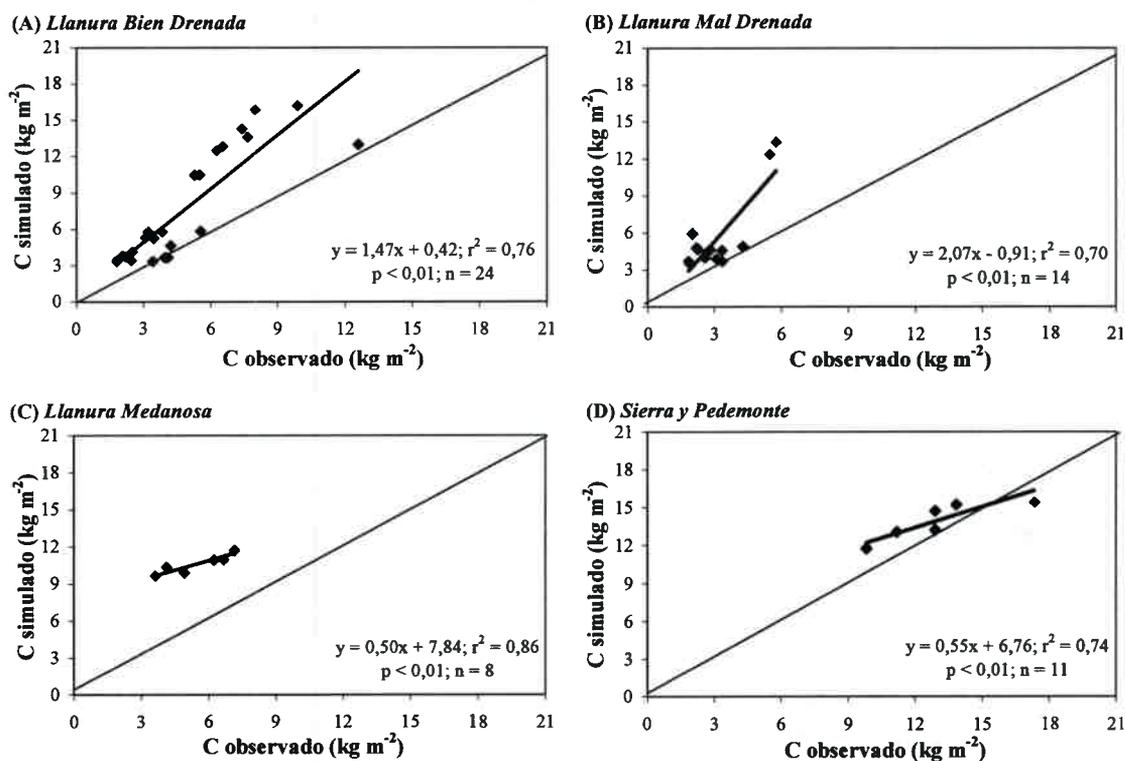


Figura 6.32: Comparación entre los valores de C orgánico total observados y simulados por el Century para los horizontes superficiales de los suelos considerados en condición natural de la llanura bien drenada (A), de la llanura mal drenada (B), de la llanura medanosa (C) y de la sierra y el pedemonte (D).

6.2.2.2 Grado de ajuste en condición actual

Para las situaciones de muestreo consideradas en condición actual, el grado de ajuste del modelo es muy bueno en todas las sub-regiones estudiadas ($r^2 = 0,82$; $p < 0,01$, $r^2 = 0,89$; $p < 0,01$, $r^2 = 0,90$; $p < 0,01$ y $r^2 = 0,72$; $p < 0,01$, para la Llanura Bien Drenada, Mal Drenada, Medanosa y la Sierra y Pedemonte, respectivamente) (Figura 6.33). A excepción de lo que ocurre en la Sierra y el Pedemonte donde el modelo subestima levemente el nivel de C en las situaciones que presentan elevados valores de C orgánico total, en las restantes sub-regiones, los valores generados por el modelo siguen muy estrechamente la recta de ajuste entre el C observado y el simulado, demostrando la bondad del mismo para predecir los valores de C orgánico total en las condiciones actuales de los horizontes superficiales de los suelos de la región bajo estudio.

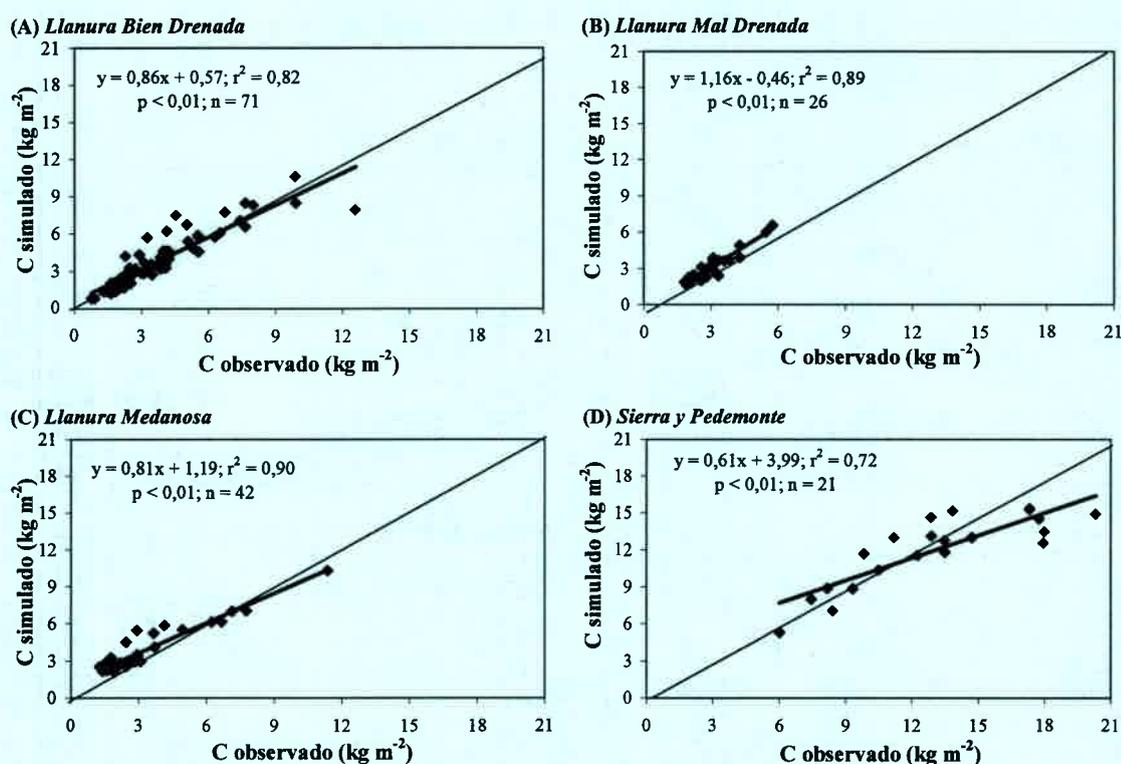


Figura 6.33: Comparación entre los valores de C orgánico total observados y simulados por el Century para los horizontes superficiales de los suelos considerados en condición actual de la llanura bien drenada (A), de la llanura mal drenada (B), de la llanura medanosa (C) y de la sierra y el pedemonte (D).

6.3 Planteo de escenarios futuros

6.3.1 Escenarios de uso y manejo de las tierras

Algunos puntos de muestreo fueron seleccionados para analizar la posible evolución del C orgánico bajo diferentes escenarios de uso y manejo del suelo durante los próximos 50 años. Estos sitios se seleccionaron arbitrariamente de manera de poder contar con puntos representativos de cada una de las sub-regiones descritas en esta tesis y cubrir todo el espectro de tipos de uso y manejo de la tierra, tanto histórico como actual que presenta la región bajo estudio. A su vez, en la elección de estos sitios, también se consideró el grado de ajuste entre los valores de C orgánico total simulados y observados actuales, para que de esta manera fueran más confiables los resultados de las simulaciones bajo los diferentes esquemas de usos futuros (Figura 6.34). Una breve síntesis de cada uno de estos sitios se presenta en la Tabla 6.1.

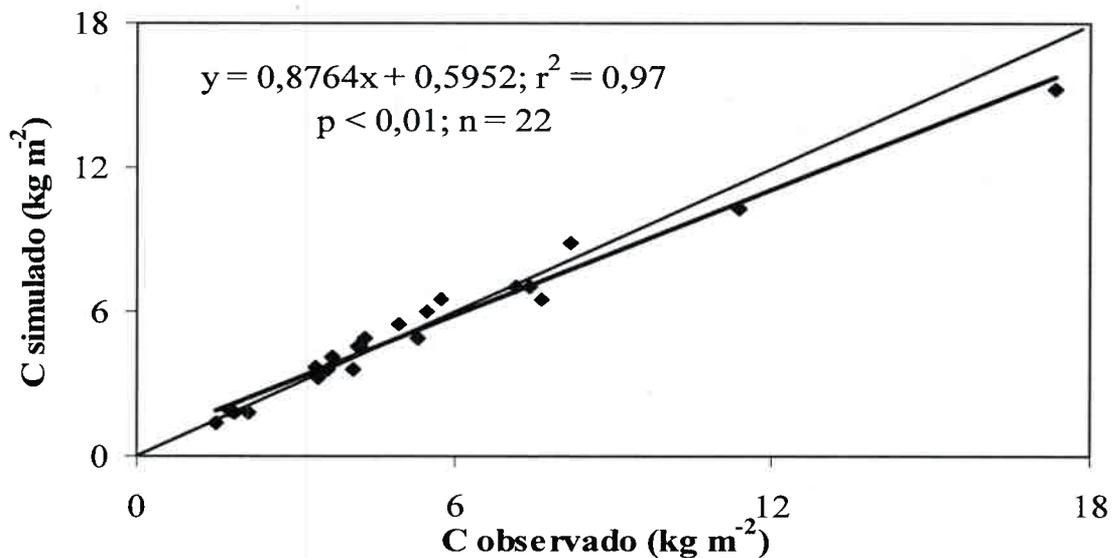


Figura 6.34: Comparación entre los valores de C orgánico total observados y simulados por el Century para los horizontes superficiales de los suelos seleccionados para analizar su posible evolución bajo diferentes escenarios de uso y manejo de las tierras durante los próximos 50 años.

Tabla 6.1: Sitios seleccionados para analizar la posible evolución del C orgánico total bajo diferentes escenarios futuros de uso y manejo de las tierras.

Sub-región	Sitio	Código	Historia de Uso y Manejo	C orgánico total (g m ⁻²)		Diferencia relativa (%)
				Observado	Simulado	
Sierra y Pedemonte	Valles medios	<i>Vam1</i>	4000 años de monte nativo, 800 años de pastoreo (carga baja), 100 años de pastoreo (carga media), desmonte, 100 años de pastoreo (carga alta)	8172	8866	8,5
	Valles pronunciados	<i>Vap1</i>	4000 años de monte nativo, 800 años de pastoreo (carga baja), 100 años de pastoreo (carga media), 100 años de pastoreo (carga alta)	17323	15257	-11,9
Llanura Medanosa	Lavaisse	<i>Lvm</i>	4000 años de monte nativo, 800 años de pastoreo (carga baja), 100 años de pastoreo (carga media), 100 años de pastoreo (carga alta)	11366	10297	-9,4
	Las Taguas	<i>LTm2</i>	4000 años de monte nativo, 800 años de pastoreo (carga baja), 100 años de pastoreo (carga media), desmonte, 100 años de pastoreo (carga alta)	4945	5480	10,8
	Rodrigo	<i>Roc1</i>	4000 años de monte nativo, 800 años de pastoreo (carga baja), 100 años de pastoreo (carga media), desmonte, 100 años de pastoreo (carga alta)	7160	7001	-2,2
	Rodrigo	<i>Roc2</i>	4000 años de monte nativo, 800 años de pastoreo (carga baja), 100 años de pastoreo (carga media), desmonte, 50 años de pastoreo (carga alta), 50 años de agricultura	3709	4080	10,0
Llanura Mal Drenada	Assunta (lomas)	<i>Asl</i>	4000 años de pastizal natural, 800 años de pastoreo (carga baja), 100 años de pastoreo (carga media), 70 años de pastoreo (carga intermedia), 30 años de rotación agrícola-ganadera	1840	1822	-1,0
	La Chanchera (lomas)	<i>LChl</i>	4000 años de pastizal natural, 800 años de pastoreo (carga baja), 100 años de pastoreo (carga media), 100 años de pastoreo (carga alta)	3369	3643	8,1
	Los Tamariscos (lomas)	<i>LT1</i>	4000 años de pastizal natural, 800 años de pastoreo (carga baja), 100 años de pastoreo (carga media), 100 años de pastoreo (carga alta)	3596	3617	0,6
	Los Tamariscos (tendidos)	<i>LT2</i>	4000 años de monte, 800 años de pastoreo (carga baja), 100 años de pastoreo (carga media), desmonte, 100 años de pastoreo (carga alta)	5764	6548	13,6
	Los Tamariscos (bajos)	<i>LT3</i>	4000 años de monte nativo, 800 años de pastoreo (carga baja), 100 años de pastoreo (carga media), desmonte, 100 años de pastoreo (carga alta)	5467	5978	9,3
	La Chanchera (bajos)	<i>LCh3</i>	4000 años de pastizal natural, 800 años de pastoreo (carga baja), 100 años de pastoreo (carga media), 100 años de pastoreo (carga alta)	4299	4889	13,7

Tabla 6.1: Continuación

Sub-región	Sitio	Código	Historia de Uso y Manejo	C orgánico total (g m ⁻²)		Diferencia relativa (%)
				Observado	Simulado	
Llanura Bien Drenada	Franza	<i>Fbm</i>	4000 años de monte nativo, 800 años de pastoreo (carga baja), 100 años de pastoreo (carga media), desmonte, 100 años de pastoreo (carga alta)	7656	6546	-14,5
	La Selva	<i>LSm</i>	4000 años de monte nativo, 800 años de pastoreo (carga baja), 100 años de pastoreo (carga media), desmonte, 100 años de pastoreo (carga alta)	7413	7046	-5,0
	Carnerillo	<i>Car</i>	4000 años de pastizal, 800 años de pastoreo (carga baja), 100 años de pastoreo (carga media), 70 años pastoreo (carga intermedia), 30 años de rotación agrícola-ganadera	2103	1819	-13,5
	Charras	<i>Chr</i>	4000 años de pastizal, 800 años de pastoreo (carga baja), 100 años de pastoreo (carga media), 70 años de pastoreo (carga intermedia), 30 años de rotación agrícola-ganadera	1765	1918	8,7
Llanura Ondulada	El Esquinazo	<i>Esm</i>	4000 años de monte nativo, 800 años de pastoreo (carga baja), 100 años de pastoreo (carga media), desmonte, 100 años de pastoreo (carga alta)	5291	4865	-8,1
	La Barranquita	<i>LBm</i>	4000 años de monte nativo, 800 años de pastoreo (carga baja), 100 años de pastoreo (carga media), desmonte, 100 años de pastoreo (carga alta)	4155	4579	10,2
	La Barranquita	<i>LBI</i>	4000 años de pastizal, 800 años de pastoreo (carga baja), 100 años de pastoreo (carga media), 100 años de pastoreo (carga alta)	3428	3293	-3,9
	La Invernada	<i>LIn</i>	4000 años de pastizal, 800 años de pastoreo (carga baja), 100 años de pastoreo (carga media), 100 años de pastoreo (carga alta)	4220	4579	8,5
	Rodeo Viejo	<i>RV1</i>	4000 años de pastizal, 800 años de pastoreo (carga baja), 100 años de pastoreo (carga media), 100 años de pastoreo (carga alta)	4085	3586	-12,2
	Suco	<i>Sua</i>	4000 años de pastizal, 800 años de pastoreo (carga baja), 100 años de pastoreo (carga media), 70 años de pastoreo (carga intermedia), 30 años de rotación agrícola-ganadera	1507	1356	-10,0

En cada uno de estos sitios, el nivel actual de C fue tomado como valor inicial a partir del cual se realizaron las simulaciones con el modelo Century. En una primera instancia, se plantearon tres tipos de esquemas de uso de la tierra bien contrastantes entre sí, en cada uno de los sitios de muestreo, para que sea posible su comparación y de esta forma analizar el impacto que produce el cambio en el uso de las tierras sobre la sustentabilidad de los diferentes agroecosistemas estudiados en esta tesis.

Los tres escenarios de uso de las tierras planteados inicialmente fueron:

- 1- Mantenimiento del uso y manejo "actual" de cada uno de los sitios para los próximos 50 años.
- 2- "Abandono" de las tierras y la paulatina re-ocupación por parte de la vegetación natural.
- 3- "Intensificación" del uso actual. En el caso de sitios de muestreo con uso ganadero, el mismo implica su cambio a un esquema agrícola con rotación de cultivos de gramíneas y leguminosas, previo desmonte si el tipo de vegetación actual así lo requiriera. En el caso de sitios actualmente agrícolas, este esquema implica un uso más intenso de las tierras, dejando de lado rotaciones agrícola-ganaderas y pasando generalmente a monocultivos de soja.

La Figura 6.35 muestra la evolución del C orgánico superficial en función de los diferentes escenarios planteados para dos sitios de muestreo pertenecientes a la subregión de Sierra y Pedemonte. En los Valles medios (símbolos negros) el nivel de C orgánico viene disminuyendo marcadamente desde comienzos del siglo XX, momento en que se extrajo el monte nativo y se intensificó el uso ganadero hasta alcanzar los valores de C actuales. De la figura puede deducirse que en este sitio, el C orgánico aún no ha alcanzado el estado de equilibrio, ya que los valores continuarían disminuyendo si se mantuviera el uso actual de la tierra. En cambio en los Valles pronunciados, donde en la actualidad predomina un uso ganadero sobre el monte nativo, puede observarse que los valores de C permanecerían prácticamente sin variaciones durante los próximos 50 años si se mantuviera la presión de pastoreo actual.

Por otra parte, en la Figura 6.35 se observa el mayor impacto que genera la introducción de la agricultura en los Valles pronunciados que en los Valles medios, ya que en dicho sitio, su introducción implica el desmonte previo, con la consecuente disminución en el aporte de biomasa vegetal. Sin embargo, también se observa cómo los

Valles medios, en la actualidad más disturbados que los Valles pronunciados, presentan mayor capacidad de recuperación (resiliencia) si fueran abandonados, aunque luego de 50 años no alcancen los niveles de C orgánico previos al desmonte.

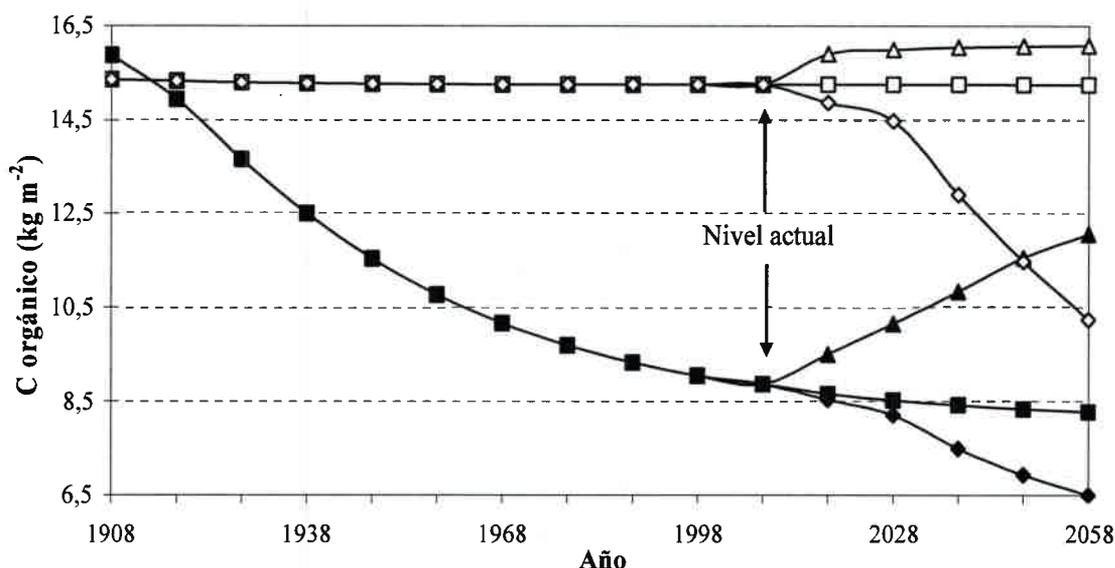


Figura 6.35: Evolución de la cantidad de C orgánico en el horizonte superficial (0 - 20 cm) de los suelos de los Valles medios (símbolos negros) y Valles pronunciados (símbolos blancos) en la sub-región Sierra y Pedemonte. Los símbolos cuadrados indican la evolución del C orgánico durante el siglo XX bajo las condiciones de uso y manejo histórico en cada sitio, y su posible evolución durante los próximos 50 años si se mantuvieran las condiciones de manejo actual. Los símbolos triangulares indican la posible evolución del C orgánico si las tierras fueran abandonadas, y los símbolos romboidales indican su posible evolución bajo uso agrícola.

En la Figura 6.36 se observa la evolución del C orgánico total durante los próximos 50 años en función de los diferentes esquemas de uso y manejo planteados para los suelos de los sitios de la Llanura Medanosa. En el caso de Lavaisse (símbolos negros de la Figura 6.36A) el nivel de C orgánico no sólo permanecería prácticamente constante si se mantuviera el manejo actual, sino que tampoco cambiaría si las tierras fueran abandonadas, demostrando el bajo nivel de alteración antrópica que presenta este sitio de muestreo. Asimismo, puede advertirse la fragilidad que presenta dicho estado de equilibrio, dado que al desmontar la vegetación natural e introducir una rotación agrícola el C orgánico cae abruptamente hasta alcanzar niveles inferiores al 50 % del valor actual (Tabla 6.2).

Las Taguas (símbolos blancos de la Figura 6.36A) también muestra tener una gran fragilidad frente a la introducción de la agricultura, alcanzando luego de 50 años

valores muy cercanos al 50 % del nivel actual, pero a diferencia de Lavaisse, también presenta muy buena capacidad de recuperación del C orgánico si las tierras fueran abandonadas (Tabla 6.2).

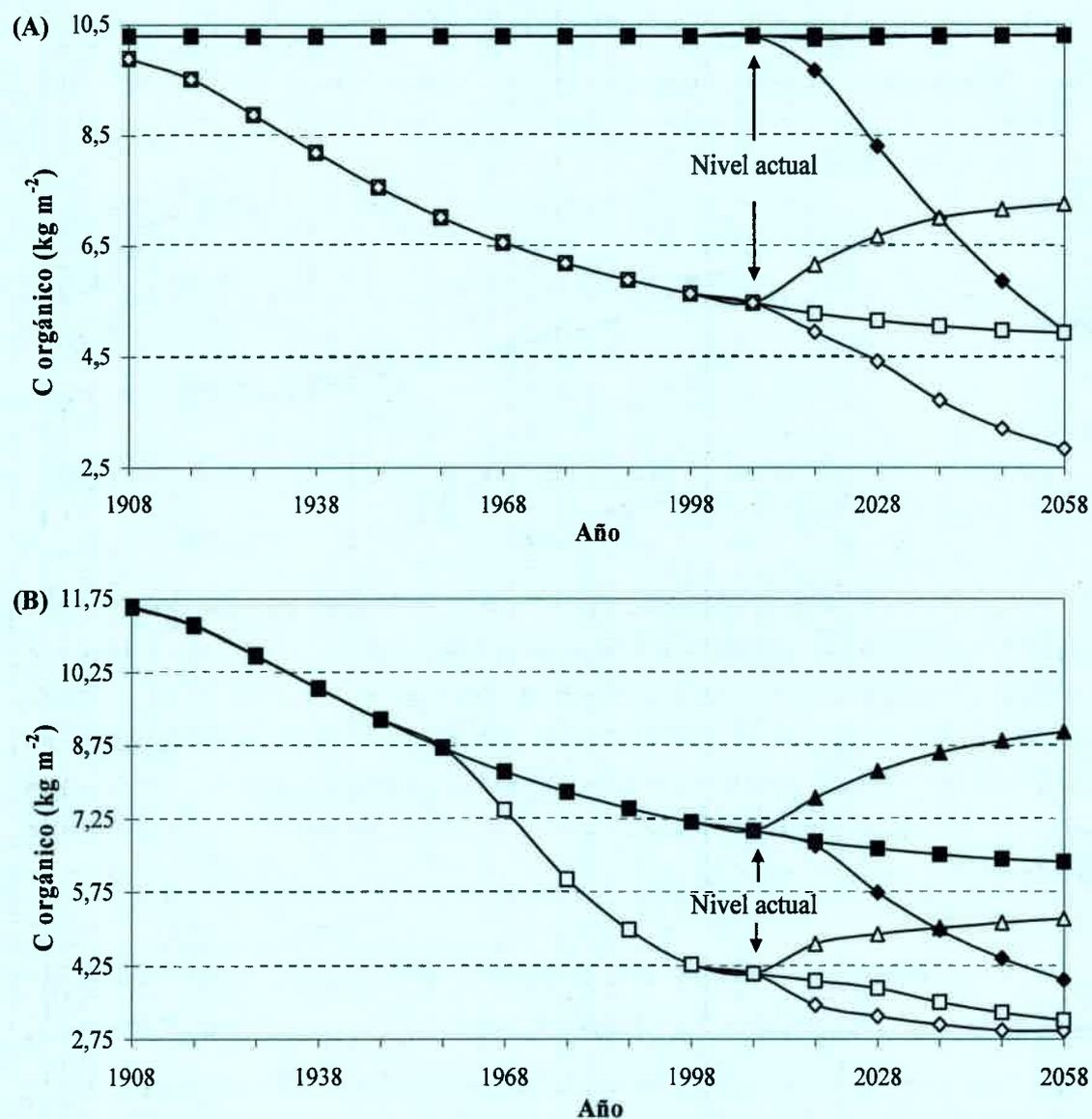


Figura 6.36: Evolución de la cantidad de C orgánico en el horizonte superficial (0 - 20 cm) de los suelos de la Llanura Medanosa. (A) Lavaisse (símbolos negros) y Las Taguas (símbolos blancos). (B) Rodrigo [Roc1] (símbolos negros) y Rodrigo [Roc2] (símbolos blancos). Los símbolos cuadrados indican la evolución del C orgánico durante el siglo XX bajo las condiciones de uso y manejo histórico en cada sitio, y su posible evolución durante los próximos 50 años si se mantuvieran las condiciones de manejo actual. Los símbolos triangulares indican la posible evolución del C orgánico si las tierras fueran abandonadas, y los símbolos romboidales indican su posible evolución bajo uso agrícola, previo desmonte en el caso de Lavaisse y una intensificación del mismo en el caso de Rodrigo [Roc2].

La Figura 6.36B muestra dos de las situaciones presentes actualmente en el establecimiento del Sr. Rodrigo, identificadas en este trabajo como *Roc1* y *Roc2* (uso pastoril y agrícola, respectivamente).

La situación bajo uso ganadero presenta un patrón de respuesta a los diferentes esquemas planteados similar al de Las Taguas. El C orgánico de la situación agrícola muestra una caída inicial como consecuencia de la intensificación de su uso, pero luego de 50 años prácticamente se iguala a los valores que presentaría si se mantuviera el uso actual.

Sin embargo, esta situación muestra una menor capacidad de recuperación del C orgánico bajo el esquema de “abandono” que la situación bajo uso ganadero, debido probablemente a la pérdida de calidad de estas tierras como consecuencia del cambio en ciertas propiedades y/o atributos (densidad aparente, porosidad total, distribución de tamaños de poros, resistencia a la penetración, etc.).

En la Figura 6.37 se observa la evolución durante los próximos 50 años del C orgánico superficial de los suelos ubicados en la sub-región de las Llanuras Mal Drenadas bajo los diferentes esquemas de uso y manejo planteados. Al realizar las simulaciones con el Century bajo los distintos usos de la tierra, tanto en los bajos [*LCh3*] como en las lomas de La Chanchera se observa el mismo patrón de evolución del C orgánico, manteniendo prácticamente constante la diferencia en contenido de C entre estos dos sitios de muestreo (Figura 6.37A).

En la Figura 6.36B se compara la evolución del C orgánico para las lomas de los sitios Los Tamariscos y Assunta (símbolos negros y blancos, respectivamente). Estos dos puntos de muestreo tienen similares características genéticas y de ahí que en el estado de equilibrio presenten niveles de C próximos entre sí. Las diferencias en los valores de C actual entre ambos sitios son consecuencia de la historia agrícola reciente que presenta Assunta, y el uso ganadero exclusivo al que fueron sometidos históricamente los suelos de Los Tamariscos. La evolución del C orgánico edáfico de Los Tamariscos que generan las simulaciones bajo los diferentes usos permite deducir que el nivel de C actual se encuentra cercano al estado de equilibrio natural, dado que no aumentaría significativamente ni aún al someter estas tierras a descansos de 50 años. Por otra parte, se observa que con la introducción de los cultivos agrícolas, el nivel de C desciende rápidamente hasta alcanzar, luego de 50 años, valores semejantes a los que presentaría Assunta.

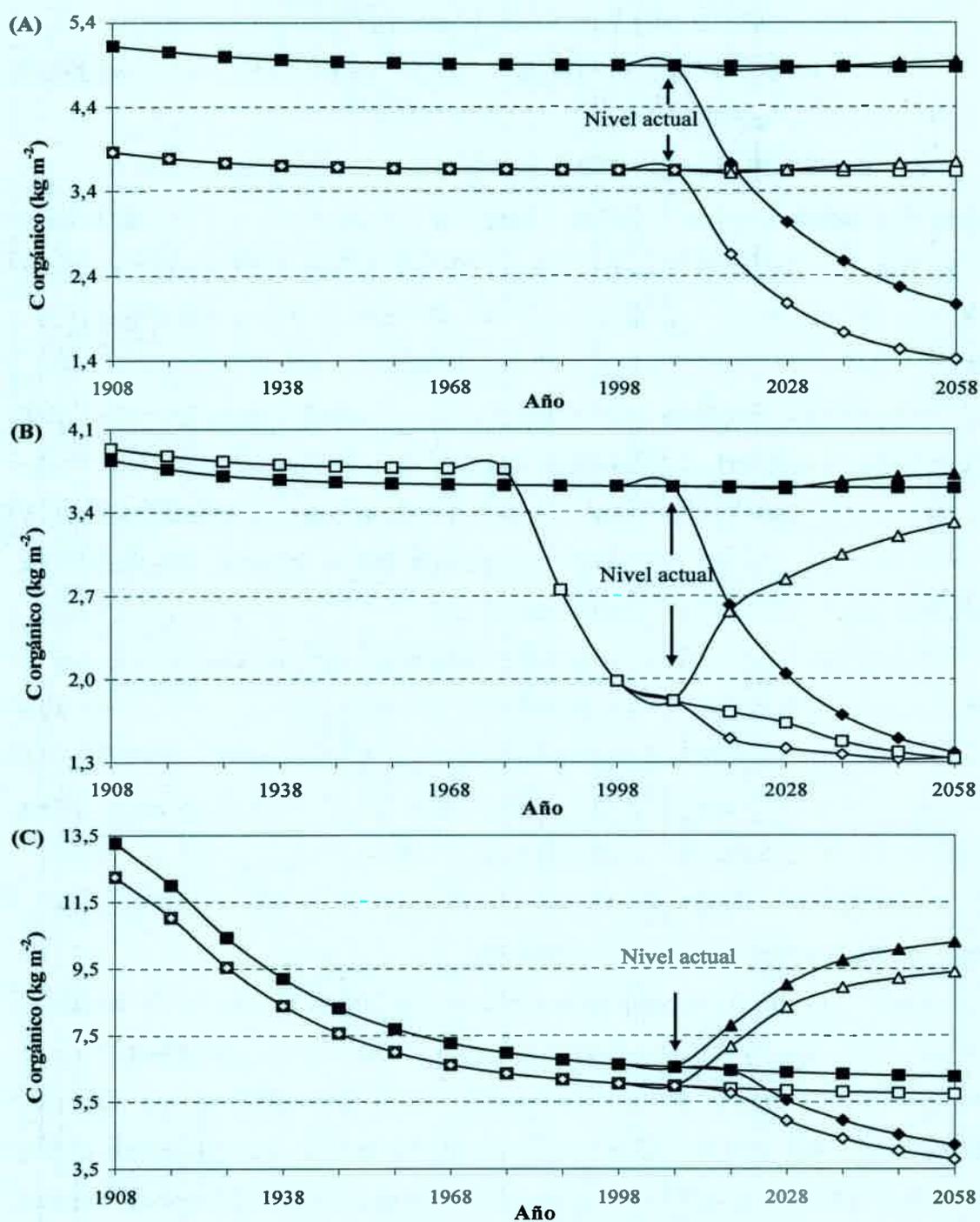


Figura 6.37: Evolución de la cantidad de C orgánico en el horizonte superficial (0 - 20 cm) de los suelos de la Llanura Mal Drenada. (A) La Chanchera bajos [LCh3] (símbolos negros) y La Chanchera lomas (símbolos blancos). (B) Los Tamariscos lomas (símbolos negros) y Assunta lomas (símbolos blancos). (C) Los Tamariscos tendidos (símbolos negros) y Los Tamariscos bajos (símbolos blancos). Los símbolos cuadrados indican la evolución del C orgánico durante el siglo XX bajo las condiciones de uso y manejo histórico en cada sitio, y su posible evolución durante los próximos 50 años si se mantuvieran las condiciones de manejo actual. Los símbolos triangulares indican la posible evolución del C orgánico si las tierras fueran abandonadas, y los símbolos romboidales indican su posible evolución bajo uso agrícola, o una intensificación del mismo en el caso de Assunta lomas.

El contenido de C de Assunta se ve poco afectado por la intensificación del uso agrícola, alcanzando dentro de 50 años niveles semejantes a los que tendría si se mantuviera el uso actual, pero por otra parte muestra gran capacidad de recuperación, ya que si estas tierras fueran abandonadas, el contenido de C orgánico se incrementaría en más del 80 % respecto al valor actual y sólo tendría 12 % menos que los valores previos a la introducción de la agricultura (Tabla 6.2).

Los tendidos y bajos de Los Tamariscos muestran similares patrones de evolución del C cuando son sometidos a los diferentes esquemas de uso planteados para los próximos 50 años (Figura 6.37C).

Estos dos sitios de muestreo en Los Tamariscos presentan mejor capacidad de recuperación del C orgánico que la posición de loma, alcanzando luego de 50 años de abandono, niveles casi 60 % mayores que los actuales y sólo un poco más del 20 % menores a los valores previos al desmonte de la vegetación natural realizado a comienzos del siglo XX (Tabla 6.2).

En la Figura 6.38 se observa la evolución del C orgánico bajo los diferentes esquemas de uso y manejo para los sitios de muestreos ubicados en la Llanura Bien Drenada. La parte A de la Figura compara dos situaciones con uso ganadero actual donde se extrajo el monte nativo aproximadamente 100 años atrás. Tanto en La Selva como en Franza, con suelos de características genéticas semejantes, se observa poca variación del contenido de C edáfico si se mantuviera el manejo actual durante los próximos 50 años, elevada susceptibilidad a la incorporación del uso agrícola y gran capacidad de recuperación si se dejaran descansar por 50 años.

En la parte B de la Figura se comparan dos situaciones bajo uso agrícola actual, Charras y Carnerillo (símbolos negros y blancos, respectivamente). De la evolución del C orgánico a partir de las diferentes simulaciones generadas para estos sitios, se deduce que ambos presentan un marcado estado de deterioro pudiendo llegar a perder más de 2/3 partes del C actual si se mantuviera el mismo uso por los próximos 50 años (Tabla 6.2). Por otra parte, ambos sitios podrían incrementar su contenido de C orgánico en más del 75 % de valor actual si fueran abandonados durante 50 años, llegando a niveles sólo 15 % por debajo de los previos a la introducción de la agricultura.

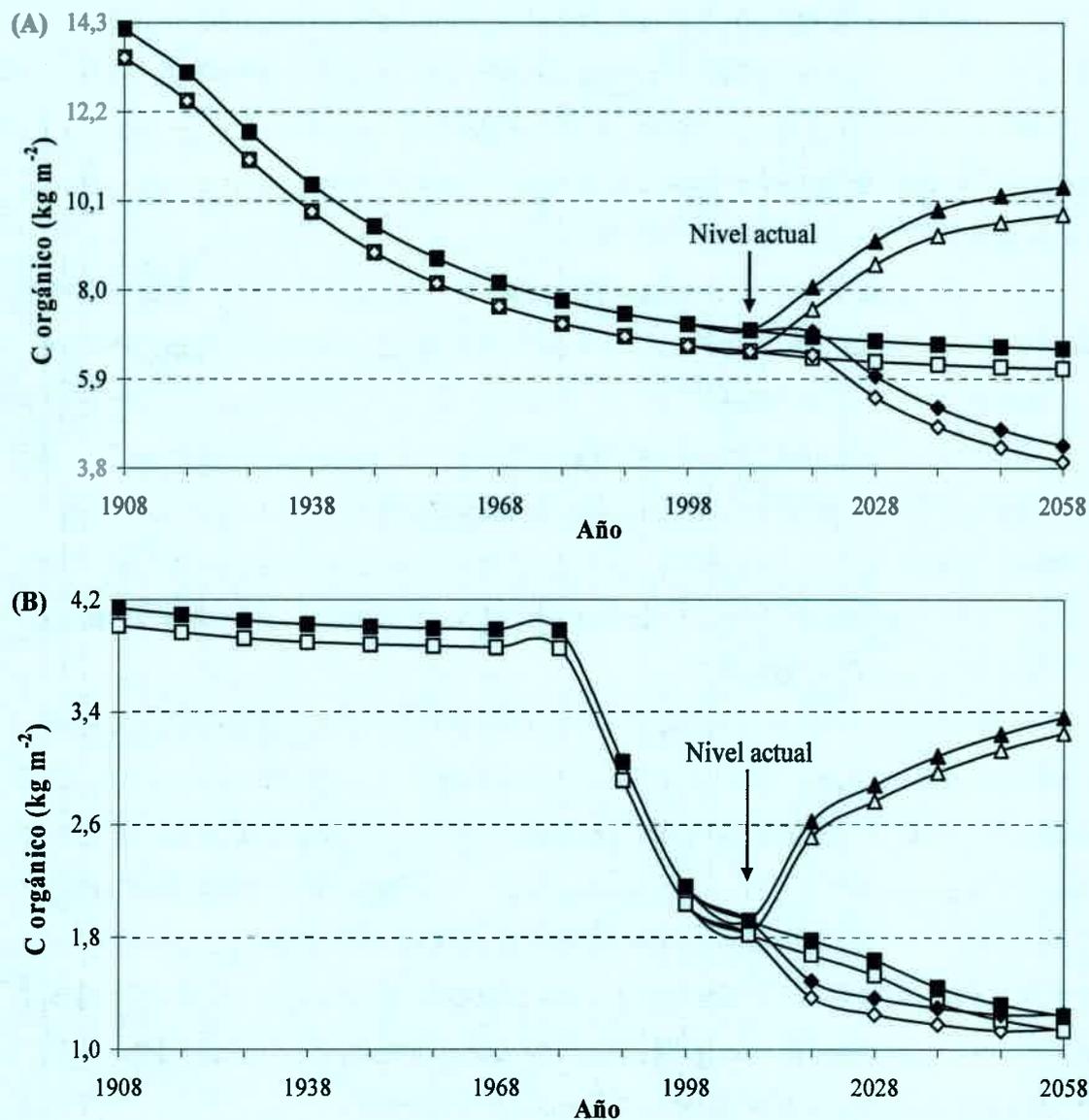


Figura 6.38: Evolución de la cantidad de C orgánico en el horizonte superficial (0 - 20 cm) de los suelos de la Llanura Bien Drenada. (A) La Selva [LSm] (símbolos negros) y Franza (símbolos blancos). (B) Charras (símbolos negros) y Carnerillo (símbolos blancos). Los símbolos cuadrados indican la evolución del C orgánico durante el siglo XX bajo las condiciones de uso y manejo histórico en cada sitio, y su posible evolución durante los próximos 50 años si se mantuvieran las condiciones de manejo actual. Los símbolos triangulares indican la posible evolución del C orgánico si las tierras fueran abandonadas, y los símbolos romboidales indican su posible evolución bajo uso agrícola, o una intensificación del mismo en el caso de Charras y Carnerillo.

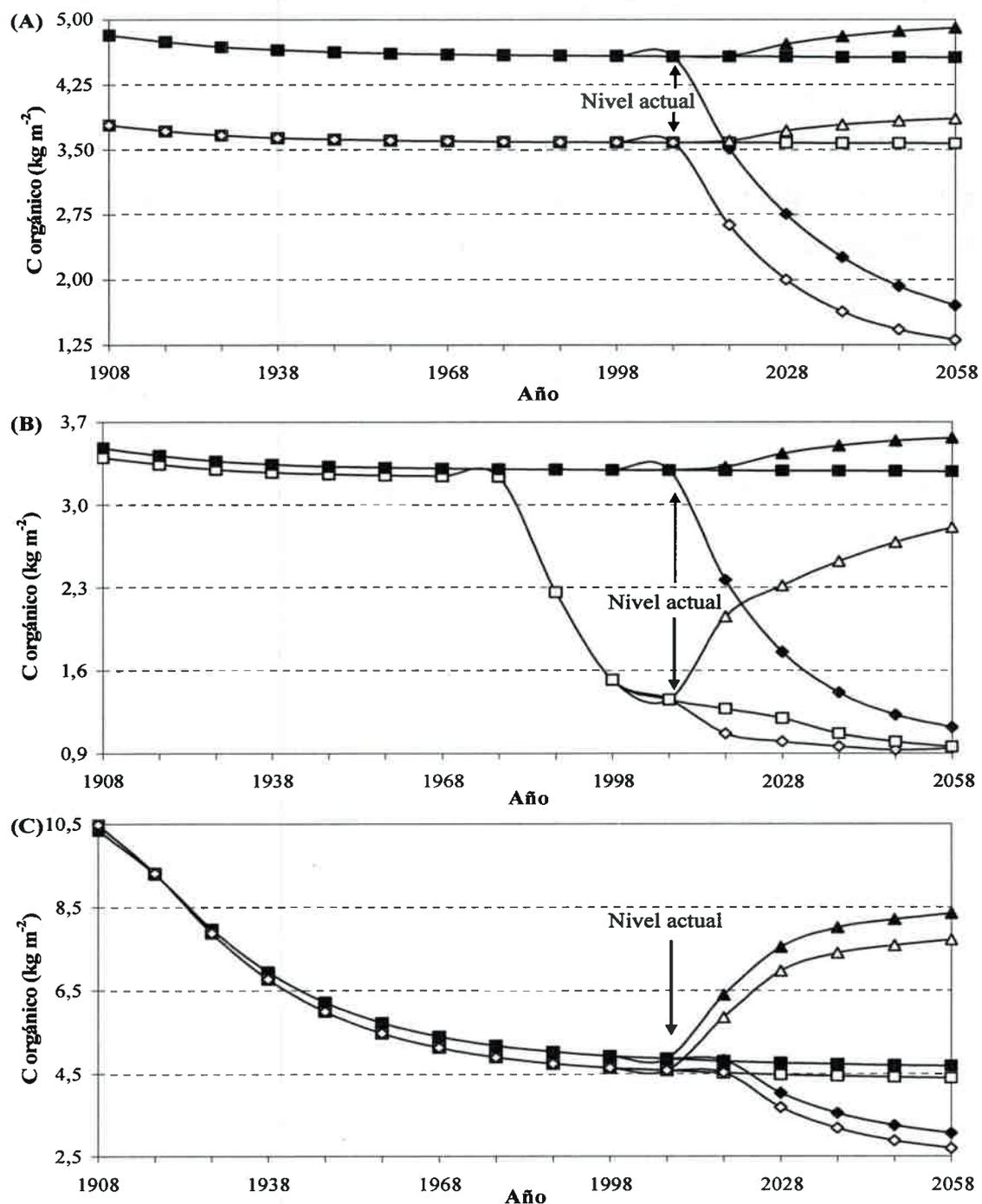


Figura 6.39: Evolución de la cantidad de C orgánico en el horizonte superficial (0 - 20 cm) de los suelos del sector Ondulado de la Llanura Bien Drenada. (A) La Invernada (símbolos negros) y Rodeo Viejo [RV1] (símbolos blancos). (B) La Barranquita [LB1] (símbolos negros) y Suco (símbolos blancos). (C) El Esquinazo [ESm] (símbolos negros) y La Barranquita [LBm] (símbolos blancos). Los símbolos cuadrados indican la evolución del C orgánico durante el siglo XX bajo las condiciones de uso y manejo histórico en cada sitio, y su posible evolución durante los próximos 50 años si se mantuvieran las condiciones de manejo actual. Los símbolos triangulares indican la posible evolución del C orgánico si las tierras fueran abandonadas, y los símbolos romboidales indican su posible evolución bajo uso agrícola, o una intensificación del mismo en el caso de Suco.

La Figura 6.39 muestra la evolución del C edáfico de los suelos del sector Ondulado de la Llanura Bien Drenada bajo los diferentes esquemas de usos y manejos planteados para realizar las simulaciones con el Century por los próximos 50 años. La Invernada, Rodeo Viejo [RV1] y La Barranquita [LB1], aunque con diferentes valores absolutos, presentan el mismo patrón de evolución del C orgánico frente a los diferentes usos, destacándose la gran susceptibilidad de estos suelos a la introducción de cultivos agrícolas, perdiendo alrededor de 2/3 partes del contenido de C actual en tan sólo 50 años (Tabla 6.2).

En la parte B de la Figura se pudo observar la evolución del C orgánico de uno de los sitios con uso agrícola actual y a partir de las simulaciones generadas inferir el extremo grado de deterioro que presenta, dado por la escasa diferenciación entre los valores obtenidos si el uso actual se mantuviera o si el mismo fuera intensificado durante los próximos 50 años. Sin embargo, este sitio muestra una extraordinaria capacidad de recuperación, incrementando su contenido de C orgánico más del 100 % del nivel actual, en 50 años de abandono (Tabla 6.2).

La parte C de la figura compara dos de las situaciones con uso actual de ganadería exclusiva, que fueron desmontadas a comienzos del siglo XX, El Esquinazo y La Barranquita, con símbolos negros y blancos, respectivamente. Aunque con diferentes valores absolutos, estos sitios presentan el mismo tipo de respuesta frente a los diferentes esquemas de uso planteados, que aquellos con similar historia de uso pero ubicados en otras sub-regiones, como por ejemplo el caso de Los Tamariscos (Figura 6.37C).

De los resultados de las simulaciones con el modelo Century para los diferentes escenarios de uso y manejo de las tierras por los próximos 50 años se desprende que la mayoría de los sitios seleccionados se encuentra muy próximo a un estado de equilibrio con el uso y manejo actual, dado que si el mismo se mantuviera invariante durante dicho lapso no provocaría importantes modificaciones en el contenido de C orgánico total (Tabla 6.2).

Muy diferente es el caso de las situaciones con uso de la tierra actual agrícola o agrícola-ganadero (Rodrigo [Roc2], Assunta lomas, Carnerillo, Charras y Suco), donde continuar con el manejo actual por los próximos 50 años provocaría una reducción del C orgánico edáfico de más del 30 % en promedio respecto al contenido actual (Tabla 6.2).

Tabla 6.2: Resultado de las simulaciones con el modelo Century para los diferentes escenarios futuros de uso y manejo de las tierras.

Sub-región	Sitio	Código	C total actual (g m ⁻²)	C total dentro de 50 años para diferentes esquemas de usos (g m ⁻²)			Variación relativa respecto del C total actual para cada esquema de uso (%)		
				“uso actual”	“abandono”	“intenso”	“uso actual”	“abandono”	“intenso”
Sierra y Pedemonte	Valles medios	<i>Vam1</i>	8866	8270	12060	6503	-6,7	36,0	-26,7
	Valles pronunciados	<i>Vap1</i>	15257	15250	16081	10236	0,0	5,4	-32,9
Llanura Medanosa	Lavaisse	<i>Lvm</i>	10297	10306	10318	4961	0,1	0,2	-51,8
	Las Taguas	<i>LTm2</i>	5480	4934	7258	2843	-9,9	32,5	-48,1
	Rodrigo	<i>Roc1</i>	7001	6364	9035	3957	-9,1	29,1	-43,5
	Rodrigo	<i>Roc2</i>	4080	2922	5207	3131	-23,3	27,6	-28,4
Llanura Mal Drenada	Assunta (lomas)	<i>Asl</i>	1822	1338	3311	1328	-26,5	81,7	-27,1
	La Chanchera (lomas)	<i>LChl</i>	3643	3630	3743	1410	-0,4	2,7	-61,3
	Los Tamariscos (lomas)	<i>LT1</i>	3617	3604	3720	1382	-0,4	2,9	-61,8
	Los Tamariscos (tendidos)	<i>LT2</i>	6548	6267	10305	4216	-4,3	57,4	-35,6
	Los Tamariscos (bajos)	<i>LT3</i>	5978	5732	9411	3789	-4,1	57,4	-36,6
Llanura Bien Drenada	La Chanchera (bajos)	<i>LCh3</i>	4889	4871	4944	2058	-0,4	1,1	-57,9
	Franza	<i>Fm</i>	6546	6143	9777	3943	-6,2	49,4	-39,8
	La Selva	<i>LSm</i>	7046	6607	10424	4325	-6,2	47,9	-38,6
	Carnerillo	<i>Car</i>	1819	1145	3251	1135	-37,0	78,7	-37,6
Llanura Ondulada	Charras	<i>Chr</i>	1918	1252	3365	1239	-34,7	75,4	-35,4
	El Esquinazo	<i>Esm</i>	4865	4684	8352	3060	-3,7	71,7	-37,1
	La Barranquita	<i>LBm</i>	4579	4396	7714	2692	-4,0	68,5	-41,2
	La Barranquita	<i>LB1</i>	3293	3282	3566	1121	-0,3	8,3	-66,0
	La Invernada	<i>LIn</i>	4579	4565	4904	1705	-0,3	7,1	-62,8
	Rodeo Viejo	<i>RV1</i>	3586	3573	3859	1306	-0,3	7,6	-63,6
	Suco	<i>Suc</i>	1356	943	2806	955	-29,5	107,0	-30,4

Los resultados de las simulaciones bajo el esquema de "abandono" muestran que algunos de los sitios seleccionados (Valles pronunciados, Lavaisse, La Chanchera tanto en las lomas como en los bajos, Los Tamariscos lomas, La Barranquita [LB1], La Invernada [LIn] y Rodeo Viejo [RV1]) presentan muy baja capacidad de recuperación del C orgánico luego de permanecer en descanso durante 50 años. Esto podría estar causado por dos motivos diferentes. Por un lado, que el extremo grado de deterioro de los suelos en estos sitios impida una adecuada recuperación, y por el otro que el nivel de C orgánico actual se encuentre cercano a los valores de equilibrio natural. Dado que ninguno de estos casos presenta elevada alteración antrópica (desmonte y/o uso actual agrícola), lo más probable es que este último motivo sea la explicación de los resultados obtenidos (Tabla 6.2).

Otro grupo de sitios (Assunta lomas, Carnerillo, Charras, El Esquinazo, La Barranquita [LBm] y Suco) muestran una gran capacidad de recuperación del C orgánico bajo el escenario de "abandono", incrementándose más del 80 % en promedio respecto de los valores actuales (Tabla 6.2), destacándose el caso de Suco con un incremento superior al 100 %. Dos de los sitios que conforman este grupo presentan uso actual ganadero y fueron desmontados a principios del siglo XX (El Esquinazo y La Barranquita [LBm]), por lo cual la situación de "abandono" implicaría una recolonización paulatina del monte nativo con el consecuente incremento en el de C por parte de la biomasa vegetal. Sin embargo, otros sitios con similar historia de uso reciente, presentan menor capacidad de recuperación del C orgánico (Los Tamariscos tendidos y bajos, Franza y La Selva), indicando menor resiliencia de estos agrosistemas y/o mayor fragilidad ante cambios en el uso de la tierra.

Los sitios restantes del grupo con elevada capacidad de recuperación provienen de una rotación agrícola-ganadera durante los últimos años. Por lo cual, el incremento en el contenido de C luego de 50 años de descanso, se da en respuesta a la gran disminución del mismo provocada por la historia de uso reciente. Vale la pena destacar el caso de Rodrigo [Roc2], que fue sometido a desmonte de la vegetación natural y a un uso exclusivamente agrícola durante los últimos años. Esta historia de uso reciente provocó una gran disminución en el contenido de C orgánico total, que no puede ser recuperada de manera adecuada ni siquiera después de 50 años de "abandono", indicando el extremo grado de deterioro que presenta esta situación.

En la Figura 6.40 puede observarse cómo el mantenimiento del uso actual de la tierra durante los próximos 50 años, mantiene los niveles de C orgánico edáfico prácticamente iguales a los actuales en todo el espectro de valores abarcados por los sitios seleccionados.

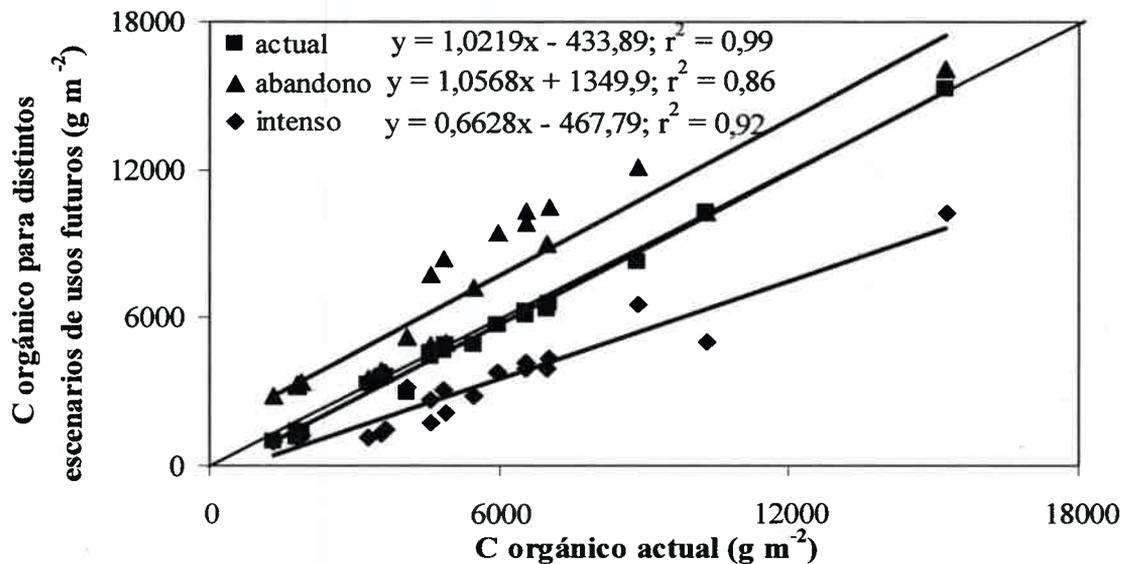
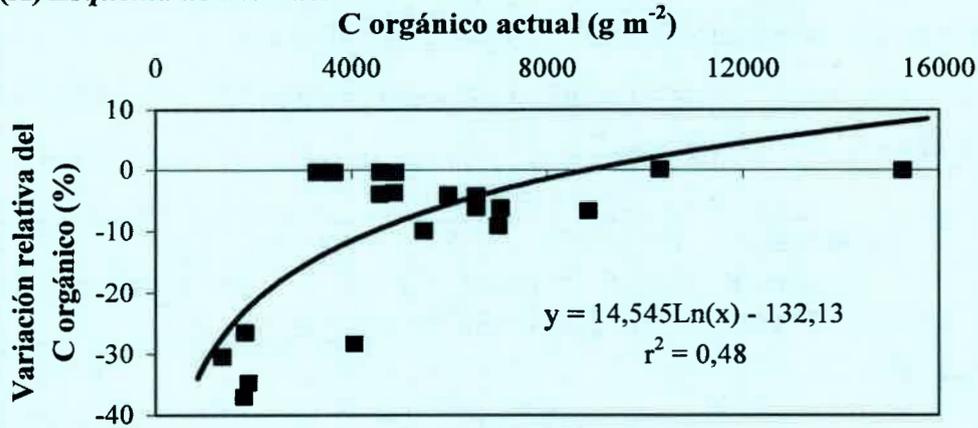


Figura 6.40: Comparación entre los valores de C orgánico total actual y los simulados por el Century frente a cada uno de los diferentes escenarios de uso y manejo de las tierras planteados para los próximos 50 años.

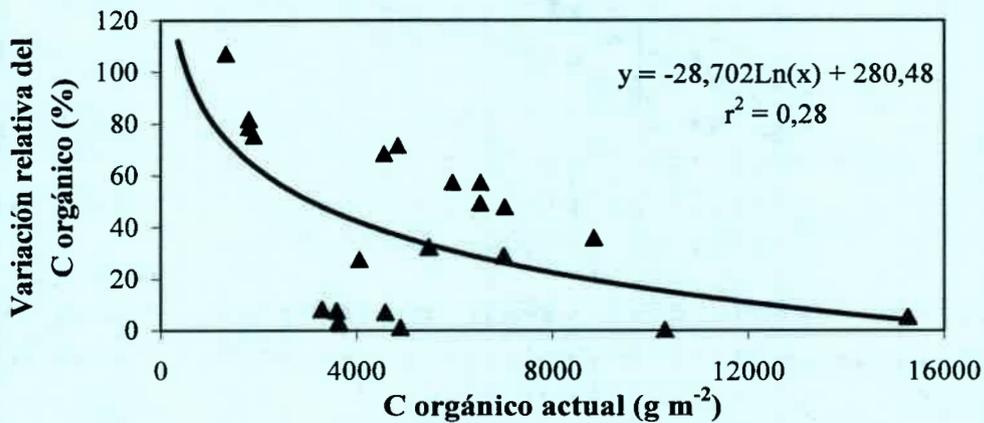
Cuando estos resultados son expresados en términos relativos, generan una tendencia logarítmica, con pérdidas significativas de C orgánico para los sitios con bajos niveles actuales, que son aquellos que presentan en la actualidad uso agrícola o agrícola-ganadero (Figura 6.41). Esto representa una disminución del contenido de C orgánico edáfico superficial a una tasa de $1,40 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, durante los próximos 50 años, equivalente a $5,12 \text{ Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ que serían liberados hacia la atmósfera, profundizando los cambios provocados por el efecto invernadero.

El esquema de uso denominado como “abandono” incrementa, en términos absolutos, la misma magnitud de C edáfico, para todo el rango de valores actuales de C. Por lo tanto, la respuesta frente a este tipo de uso de la tierra disminuye con el aumento en el contenido de C orgánico edáfico cuando es expresado en forma relativa al mismo, generando una tendencia logarítmica negativa (Figura 6.41). El abandono de las tierras durante los próximos 50 años generaría un secuestro neto de C atmosférico por parte del suelo a una tasa de $7,27 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, equivalente a $26,65 \text{ Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

(A) Esquema de uso "actual"



(B) Esquema de uso "abandono"



(C) Esquema de uso "intenso"

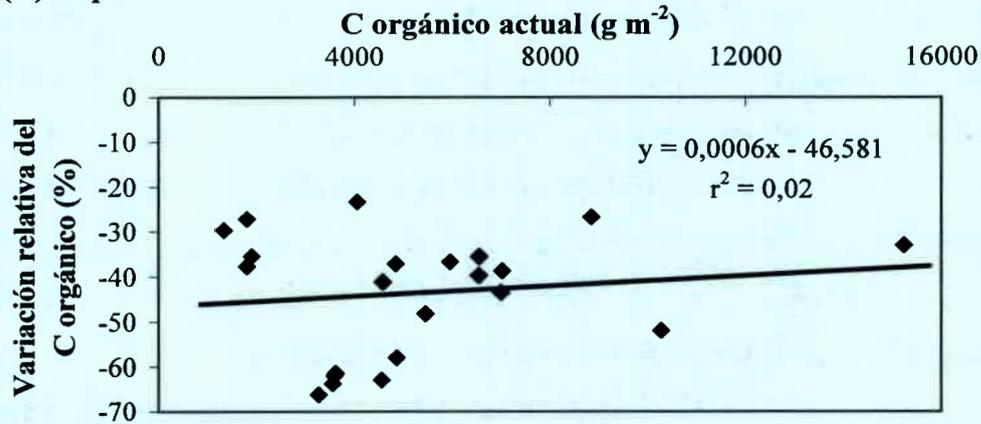


Figura 6.41: Variación relativa del C orgánico total respecto a los valores actuales para cada uno de los diferentes escenarios de uso y manejo de las tierras planteados por los próximos 50 años.

Por otro lado, con la intensificación del uso actual de las tierras, las pérdidas en términos absolutos del C orgánico edáfico aumentan con el incremento en el valor de C actual del suelo (Figura 6.40), que al expresarlo en términos relativos genera una

tendencia lineal con muy mal grado de ajuste como consecuencia de la gran dispersión de los valores a bajos niveles de C orgánico actual (Figura 6.41). Estas pérdidas se producirían a tasas de $9,95 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, equivalentes a $36,50 \text{ Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

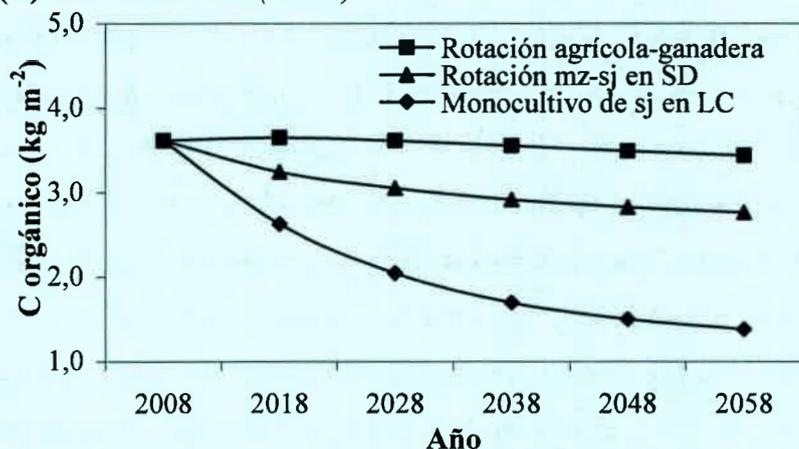
Para precisar aún más la capacidad y sensibilidad del modelo Century como herramienta de monitoreo y evaluación de la calidad edáfica y sustentabilidad de los sistemas productivos, se plantearon tres sistemas de uso y manejo de las tierras bien contrastantes, de manera que la mayor parte de los posibles sistemas de uso y manejo utilizados por los productores locales queden comprendidos dentro del rango de valores arrojados por el modelo. Los escenarios de manejo planteados son: (1) monocultivo de soja bajo labranza convencional, (2) rotación maíz-soja bajo siembra directa, y (3) rotación agrícola-ganadera, consistente en seis años de alternancia de los cultivos maíz y soja bajo siembra directa y cuatro años de praderas polifíticas. Para el diseño de las simulaciones se seleccionaron arbitrariamente algunos puntos de muestreo, de manera de poder contar con sitios representativos de las diferentes sub-regiones estudiadas, con historias de uso y manejo y formaciones vegetales en el estado original diferentes.

En la Figura 6.42 se representan los resultados obtenidos de las simulaciones con los diferentes sistemas de uso y manejo de las tierras para las situaciones con vegetación original de pastizal. En la misma se observa que en todos los casos el monocultivo de soja bajo labranza convencional es el esquema más agresivo, produciendo importantes pérdidas en el contenido de C orgánico edáfico. La rotación agrícola-ganadera prácticamente no modifica la cantidad de materia orgánica en dos de las situaciones, y la incrementa en el caso de Carnerillo. A su vez, en este sitio de muestreo, la rotación de cultivos anuales bajo siembra directa produjo una respuesta muy similar a la obtenida con el monocultivo de soja. Estos resultados estarían demostrando el profundo estado de degradación y/o deterioro actual de este sistema productivo.

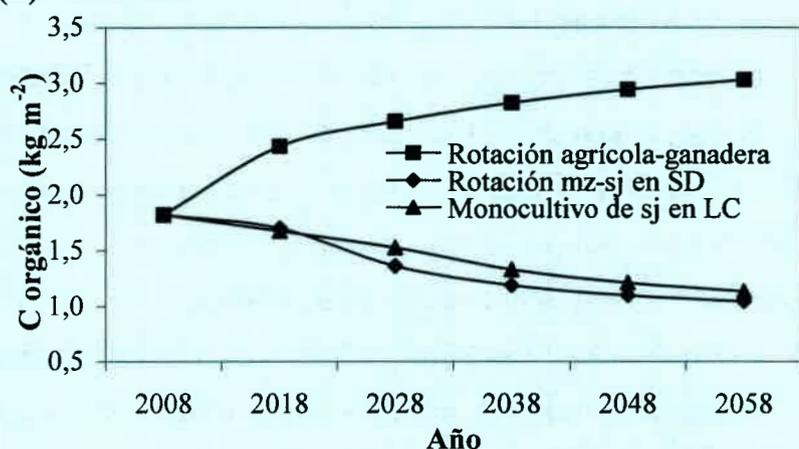
Por otra parte, en la Figura 6.43 se representan los resultados de las simulaciones para las situaciones con vegetación natural de monte. En estos sitios los esquemas de manejo evaluados generaron respuestas diferentes a las obtenidas en aquellos sitios bajo vegetación de pastizal. Si bien el monocultivo de soja bajo labranza convencional produjo las mayores pérdidas de C orgánico, el esquema que mantuvo los niveles más elevados de materia orgánica fue la rotación de cultivos anuales bajo siembra directa, superando a los valores obtenidos por la rotación agrícola-ganadera. El marcado descenso inicial en los niveles de C orgánico edáfico en los sistemas de producción

mixtos, puede explicarse como consecuencia del menor aporte generado por el pastoreo de los rastrojos que se practica frecuentemente en estos sistemas de producción. Esto también fue tenido en cuenta al momento de diseñar las simulaciones.

(A) *Los Tamariscos (lomas)*



(B) *Carnerillo*



(C) *La Barranquita (LBI)*

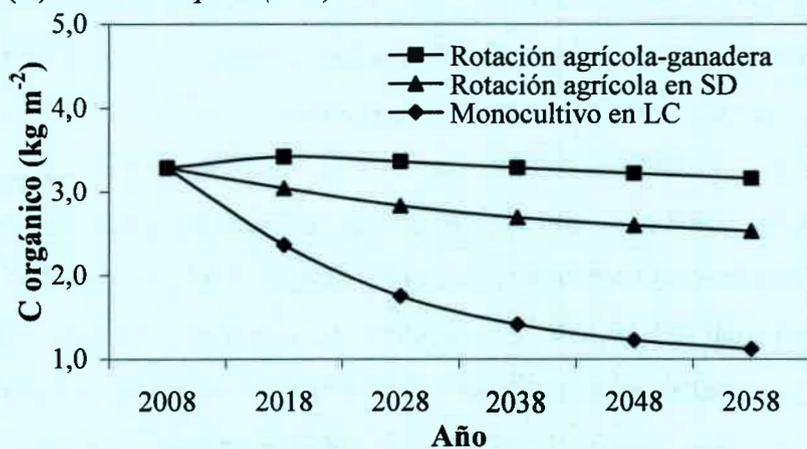


Figura 6.42: Variación relativa del C orgánico total respecto a los valores actuales para cada uno de los diferentes escenarios de uso y manejo de las tierras planteados por los próximos 50 años.

Independientemente de las variaciones en el contenido de C orgánico total, en la evaluación y elección de diferentes alternativas de sistemas de uso y manejo de las tierras, en función de su efecto sobre la calidad del suelo y la sustentabilidad del sistema productivo, es interesante el análisis de la evolución en la calidad de la materia orgánica edáfica, a través de las variaciones en su composición. La ventaja de este tipo de análisis es que resulta mucho más sensible frente a pequeños cambios en las prácticas de manejo por un lado, y que las respuestas se pueden obtener en lapsos de tiempo más cortos.

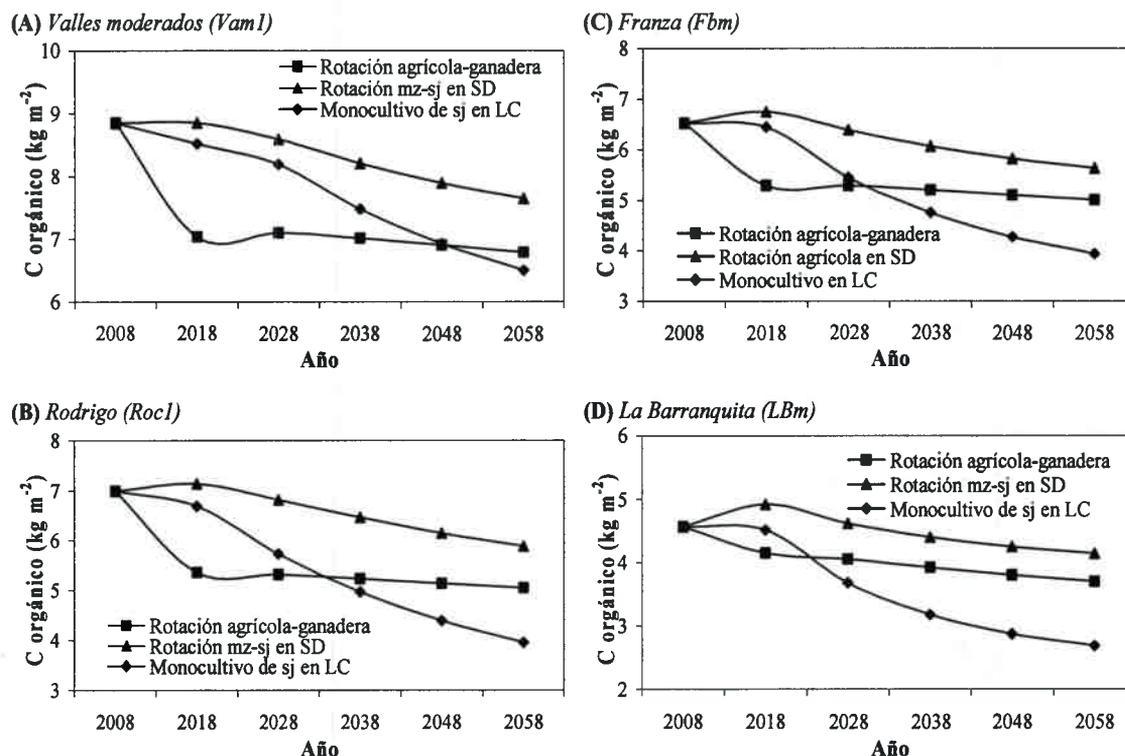


Figura 6.43: Variación relativa del C orgánico total respecto a los valores actuales para cada uno de los diferentes escenarios de uso y manejo de las tierras planteados por los próximos 50 años.

En la Tabla 6.3 se presentan los resultados de las simulaciones realizadas para el análisis de la evolución en la partición del C orgánico edáfico. En todos los casos analizados se observa un incremento en la proporción relativa del C pasivo al pasar del esquema agrícola-ganadero al de monocultivo de soja baja labranza convencional, con la correspondiente disminución de las fracciones activas y estables.

La partición del C orgánico obtenida a partir de las simulaciones bajo los diferentes esquemas de uso y manejo de las tierras realizadas, aporta un rango de referencia que permite comparar el estado de deterioro que presenta cada uno de los sitios evaluados en la actualidad, bajo las condiciones ambientales locales.

Tabla 6.3: Variaciones en la partición del C orgánico edáfico para diferentes alternativas de uso y manejo de la tierra durante los próximos 50 años a partir de simulaciones realizadas con el modelo Century.

Vegetación original	Sitio	Partición del C orgánico	C orgánico final (g m ⁻²)				Proporción relativa (%)			
			actual (g m ⁻²)	(*)Rotación agrícola-ganadera	Rotación mz-sj en SD	Monocultivo de sj en LC	Actual	(*)Rotación agrícola-ganadera	Rotación mz-sj en SD	Monocultivo de sj en LC
Monte	Valles moderados (Vam1)	C total	8866	6792	7658	6503				
		C activo	143	142	93	50	1,61	2,08	1,22	0,77
		C estable	3184	3579	2267	1203	35,91	52,70	29,61	18,50
		C pasivo	5539	3071	5297	5249	62,48	45,22	69,17	80,72
	Rodrigo (Roc1)	C total	7001	5056	5894	3957				
		C activo	140	124	98	29	2,00	2,46	1,66	0,72
		C estable	3916	3654	2905	1084	55,94	72,28	49,30	27,40
	Franza (Fm)	C pasivo	2944	1277	2890	2844	42,06	25,26	49,04	71,88
		C total	6546	5021	5652	3943				
		C activo	118	111	80	20	1,80	2,21	1,41	0,51
	La Barranquita (LBm)	C estable	2920	3099	2163	589	44,61	61,73	38,26	14,94
		C pasivo	3508	1810	3410	3333	53,60	36,06	60,33	84,55
		C total	4579	3704	4150	2692				
	Los Tamariscos (lomas)	C activo	77	70	47	7	1,67	1,88	1,76	0,26
		C estable	1969	2192	1525	193	42,99	59,17	56,35	7,17
C pasivo		2534	1443	2578	2491	55,34	38,95	41,89	92,56	
Pastizal	Carnerillo (Car)	C total	3617	3438	2760	1382				
		C activo	85	74	48	6	2,35	2,15	1,76	0,43
		C estable	2073	2034	1410	139	57,32	59,18	51,09	10,08
	La Barranquita (LBI)	C pasivo	1459	1330	1301	1237	40,33	38,68	47,15	89,49
		C total	1819	3030	1043	1135				
		C activo	12	70	1	4	0,67	2,30	0,09	0,37
	La Barranquita (LBI)	C estable	603	1878	35	109	33,13	61,99	3,34	9,62
		C pasivo	1204	1082	1007	1022	66,20	35,70	96,57	90,01
		C total	3293	3164	2528	1121				
	La Barranquita (LBI)	C activo	83	65	45	4	2,51	2,07	1,14	0,37
		C estable	2066	2017	1424	114	62,72	63,76	36,74	10,13
		C pasivo	1145	1081	1058	1003	34,77	34,17	62,12	89,50

Referencias: (*) rotación 4 años de pradera polifítica + 6 años de mz-sj bajo siembra directa; mz: maíz; sj: soja; SD: siembra directa; LC: labranza convencional.

6.3.2 Escenarios de cambio climático

En el año 1988 se creó el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC), organismo dependiente de Naciones Unidas, con el objeto de estudiar la problemática del Cambio Climático y buscar las posibles estrategias de mitigación. Años más tarde, el Protocolo de Kyoto (1997) establece la necesidad de limitar o reducir la emisión de gases de efecto invernadero debido al cambio climático producido en el planeta. Más recientemente, la conferencia en la isla Indonesia (2007), concluyó con un acuerdo firmado por 187 países, que expresa la necesidad de un acuerdo global más ambicioso que el Protocolo de Kyoto, iniciando las negociaciones para sustituirlo en 2009.

El suelo absorbe radiación proveniente del Sol, así comienza a elevar su temperatura y a emitir radiación hacia la atmósfera. Esta radiación es absorbida por los gases de efecto invernadero, que de la misma manera que el suelo, comienzan a emitir radiación en el rango de longitud de onda del infrarrojo, provocando lo que se conoce como efecto invernadero, manteniendo así la temperatura del planeta. En la atmósfera terrestre, los principales gases de efecto invernadero son el vapor de agua (H₂O), el dióxido de carbono (CO₂), el óxido nitroso (N₂O), el metano (CH₄) y el ozono (O₃).

La temperatura media del planeta se está elevando a tasas crecientes, llegando a incrementos de 1,8 °C siglo⁻¹ en los últimos 25 años, debido a las emisiones de gases de efecto invernadero resultantes de ciertas actividades humanas, como ser el rápido y constante incremento de la quema de combustibles fósiles, el aumento de la deforestación y la expansión de las áreas cultivadas (Labraga, 1998; Magrin, 2007). De acuerdo al último informe del IPCC, hacia fines del siglo XXI la temperatura de Sudamérica aumentaría entre 1,8 °C y 7,5 °C, produciéndose los mayores aumentos en las zonas intertropicales, con muy alta probabilidad de que las lluvias continúen aumentando en el sudeste de América del Sur (IPCC, 2007).

Las consecuencias de este cambio se están manifestando a nivel global y regional. En América Latina, varias regiones presentaron cambios significativos en los registros de precipitaciones (aumentaron en el sudeste de Sudamérica, noroeste de Perú y Ecuador, y disminuyeron en el centro de Chile, centro-oeste de Argentina y sur de Perú), se incrementó la frecuencia de ocurrencia de eventos climáticos extremos (especialmente los relacionados con lluvias intensas y ocurrencia de noches cálidas) y se

registraron episodios sin precedentes (como el huracán Catarina en el Atlántico sur) que incrementaron la vulnerabilidad climática de diversos sistemas (IPCC, 2007).

La concentración atmosférica de gases de efecto invernadero se ha incrementado continuamente desde el comienzo de la era industrial (mediados del siglo XVIII). El CO₂ ha aumentado más de 30 %, alcanzando 370 ppm a finales del siglo XX (IPCC, 1996a, b; Hulme y Sheard, 1999). En la actualidad, las actividades agrícolas contribuyen con un 20 % a la emisión antropogénica total de CO₂, CH₄ y N₂O, y otro 14 % es producido como consecuencia de los cambios en el uso de la tierra, que generalmente involucra la conversión del ecosistema natural a un uso agrícola (Cole *et al.*, 1997; Lokupitiya & Paustian, 2006).

A partir de las predicciones realizadas en el último informe del IPCC (2007) sobre los cambios que podrían producirse en el clima de la región bajo estudio, se plantearon diferentes escenarios de cambio climático para analizar su efecto sobre la evolución de la materia orgánica edáfica de los sitios seleccionados en este capítulo durante los próximos 50 años.

Los tres escenarios de cambio climático planteados para realizar las simulaciones con el modelo Century son:

- 4- Mantenimiento de las condiciones climáticas actuales de cada uno de los sitios seleccionados durante los próximos 50 años (clima actual).
- 5- Incremento de la temperatura media anual en 2 °C, más un aumento del 20 % en las precipitaciones (> T° y > PP).
- 6- Incremento de la temperatura media anual en 2 °C, manteniendo el nivel actual de las precipitaciones (> T°).

En todos los casos, las simulaciones con cada uno de los escenarios de cambio climático, se realizaron considerando que se mantiene el uso y manejo actual de cada sitio durante el período analizado. Como fue analizado anteriormente (Tabla 6.2), ciertas variaciones en el contenido de C orgánico edáfico de los sitios seleccionados se producen como consecuencia del mantenimiento del uso actual durante los próximos 50 años. Por tal motivo, para que sea posible diferenciar los efectos del cambio climático y del uso de las tierras sobre la evolución del C orgánico, en la Tabla 6.4 se presenta la variación porcentual del C edáfico superficial obtenido con cada escenario climático,

respecto al contenido que presentaría cada sitio si se mantuvieran las condiciones climáticas actuales.

A diferencia de lo que se podría presuponer, los posibles cambios en las condiciones climáticas, por lo menos a nivel regional, tienen muy poco efecto sobre el contenido de C orgánico superficial de los sitios seleccionados en este capítulo (Tabla 6.4). En promedio, el aumento durante los próximos 50 años, de 2 °C en la temperatura media anual y el 20 % en las precipitaciones, incrementaría el C orgánico en sólo 2,1 % respecto al contenido de C bajo las condiciones climáticas actuales. Si el cambio climático se produjera sólo por el aumento en la temperatura enunciado, prácticamente no afectaría al contenido de C orgánico, incrementándose 0,1 %.

Estas pequeñas diferencias observadas a favor del escenario climático “> T° y > PP”, respecto de aquel en el sólo aumenta la temperatura, podrían deberse a que la mayor temperatura incrementa el déficit hídrico disminuyendo la producción de biomasa vegetal, sin poder ser compensada por un aumento en la precipitaciones.

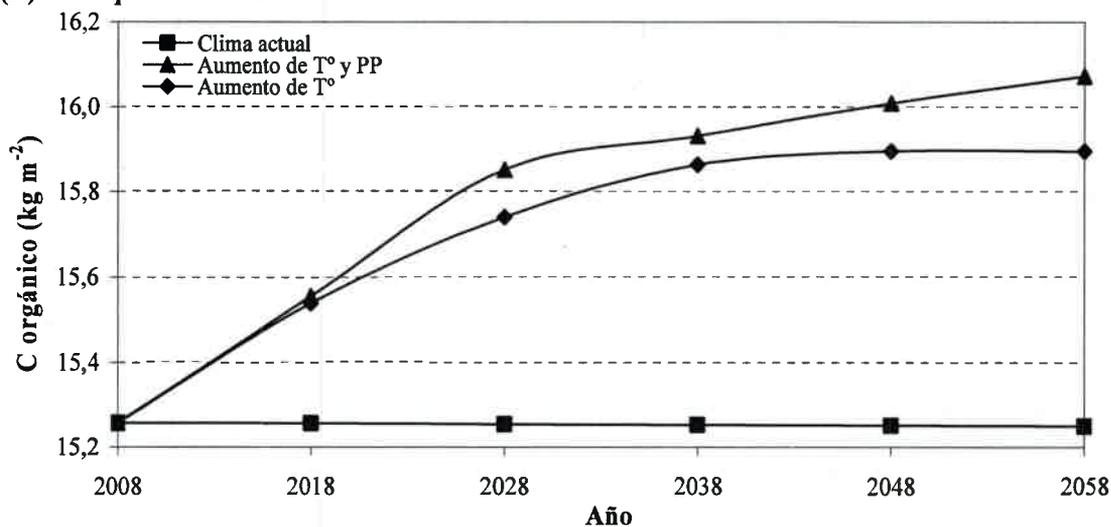
Como fue mencionado anteriormente, el mantenimiento del uso “actual” durante los próximos 50 años, provocaría en promedio para todos los sitios seleccionados, una disminución en el C orgánico edáfico del orden del 6 % respecto al contenido actual (Tabla 6.2). Esto significa, que bajo cualquiera de los escenarios climáticos planteados, se produciría una disminución neta del C orgánico superficial.

Los dos sitios de la Sierra y el Pedemonte seleccionados, mostraron diferente respuesta frente a los posibles escenarios de cambio climático (Figura 6.44). En los Valles Medios, el contenido de C orgánico de los suelos evoluciona bajo los dos escenarios de cambio climático, prácticamente igual a la evolución que tendría si el clima se mantuviera como en la actualidad. En cambio, en los Valles Pronunciados, con ambos escenarios climáticos, el C orgánico se incrementaría alrededor de un 5 %, respecto del clima “actual” (Tabla 6.4).

Tabla 6.4: Resultado de las simulaciones con el modelo Century para los diferentes escenarios futuros de cambio climático.

Sub-región	Sitio	Código	C total dentro de 50 años para diferentes escenarios climáticos (g m ⁻²)			Variación relativa respecto del C total bajo el clima actual para cada escenario climático (%)	
			"clima actual"	"> t° y > PP"	"> t°"	"> t° y PP"	"> t°"
Sierra y Pedemonte	Valles medios	<i>Vam1</i>	8270	8338	8212	0,8	-0,7
	Valles pronunciados	<i>Vap1</i>	15250	16072	15895	5,4	4,2
Llanura Medanosa	Lavaisse	<i>Lvm</i>	10306	10248	9929	-0,6	-3,7
	Las Taguas	<i>LTm2</i>	4934	5060	4822	2,6	-2,3
	Rodrigo	<i>Roc1</i>	6364	6465	6186	1,6	-2,8
	Rodrigo	<i>Roc2</i>	2922	3116	3013	6,6	3,1
Llanura Mal Drenada	Assunta (lomas)	<i>Asl</i>	1338	1634	1605	22,1	19,9
	La Chanchera (lomas)	<i>LCh1</i>	3630	3364	3290	-7,3	-9,3
	Los Tamariscos (lomas)	<i>LT1</i>	3604	3340	3267	-7,3	-9,4
	Los Tamariscos (tendidos)	<i>LT2</i>	6267	6470	6377	3,2	1,7
	Los Tamariscos (bajos)	<i>LT3</i>	5732	5928	5840	3,4	1,9
	La Chanchera (bajos)	<i>LCh3</i>	4871	4570	4481	-6,2	-8,0
Llanura Bien Drenada	Franza	<i>Frm</i>	6143	6211	6102	1,1	-0,7
	La Selva	<i>LSm</i>	6607	6680	6565	1,1	-0,6
	Carnerillo	<i>Car</i>	1145	1469	1455	28,2	27,0
	Charras	<i>Chr</i>	1252	1578	1564	26,0	24,9
Llanura Ondulada	El Esquinazo	<i>Esm</i>	4684	5139	5109	9,7	9,1
	La Barranquita	<i>LBm</i>	4396	4643	4614	5,6	5,0
	La Barranquita	<i>LB1</i>	3282	3113	3084	-5,2	-6,0
	La Invernada	<i>LIn</i>	4565	4330	4300	-5,1	-5,8
	Rodeo Viejo	<i>RV1</i>	3573	3389	3360	-5,2	-6,0
	Suco	<i>Suc</i>	943	1184	1175	25,6	24,6

(A) *Valles pronunciados*



(B) *Valles medios*

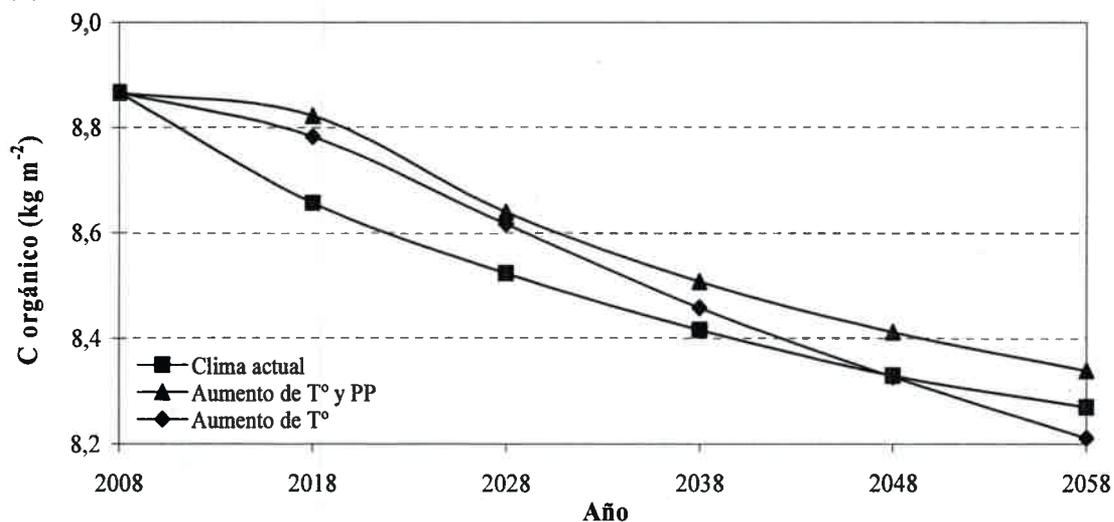


Figura 6.44: Evolución de la cantidad de C orgánico en el horizonte superficial (0 - 20 cm) de los suelos de los Valles pronunciados (A) y Valles medios (B) en la sub-región Sierra y Pedemonte bajo distintos escenarios de cambio climático. Los símbolos cuadrados indican la evolución del C orgánico durante los próximos 50 años bajo las condiciones climáticas actuales. Los símbolos romboidales indican la posible evolución del C orgánico si las temperaturas aumentaran 2 °C, y los símbolos triangulares indican su posible evolución con un incremento de 2 °C en las temperaturas y 20 % en las precipitaciones.

Los posibles cambios en las condiciones climáticas afectan de diferente manera a los distintos sitios ubicados en la Llanura Medanososa (Figura 6.45). En Lavaisse, los dos escenarios climáticos utilizados para las simulaciones producen una disminución del C orgánico, respecto del contenido bajo el clima actual, aunque en ambos casos dicha disminución es de escasa magnitud. En Las Taguas, el incremento en las temperaturas y

las precipitaciones produciría un pequeño aumento del contenido de C orgánico, respecto de su contenido bajo el clima actual. En cambio, se produciría una disminución de aproximadamente la misma magnitud si sólo aumentaran las temperaturas.

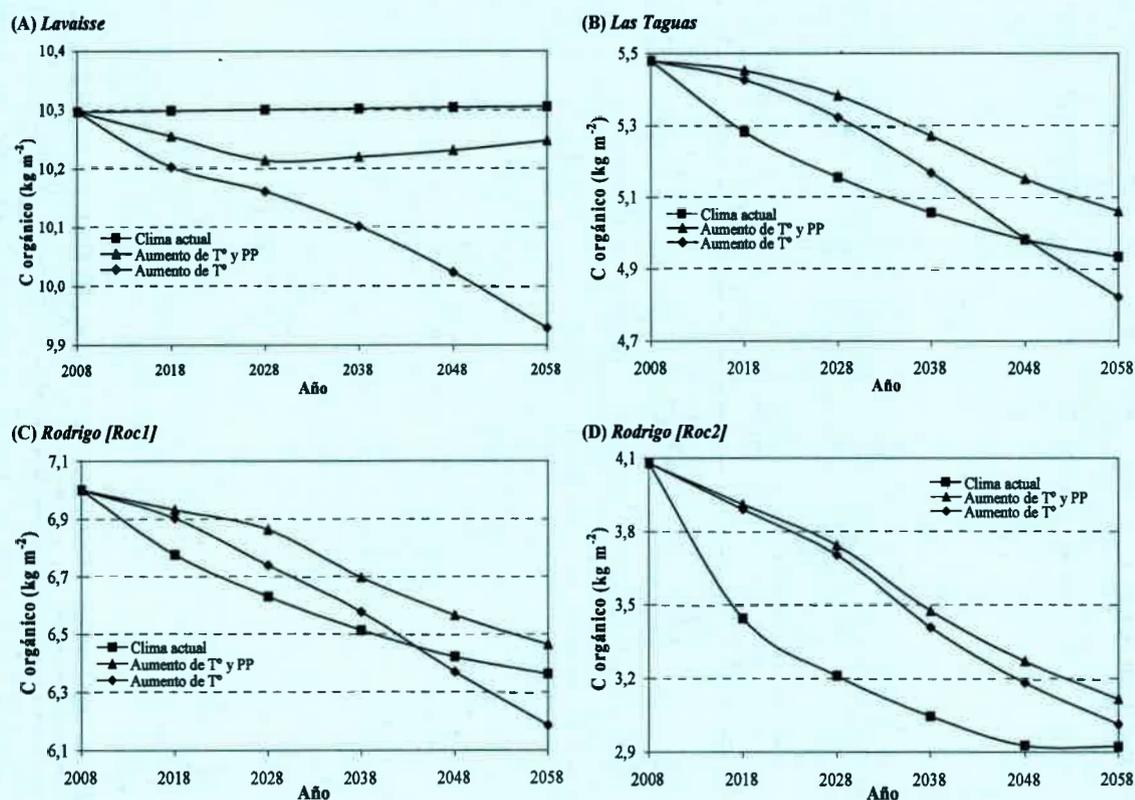


Figura 6.45: Evolución de la cantidad de C orgánico en el horizonte superficial (0 - 20 cm) de los suelos de la Llanura Medanosa bajo distintos escenarios de cambio climático. (A) Lavaisse, (B) Las Taguas, (C) Rodrigo [Roc1] y (D) Rodrigo [Roc2]. Los símbolos cuadrados indican la evolución del C orgánico durante los próximos 50 años bajo las condiciones climáticas actuales. Los símbolos romboidales indican la posible evolución del C orgánico si las temperaturas aumentaran 2 °C, y los símbolos triangulares indican su posible evolución con un incremento de 2 °C en las temperaturas y 20 % en las precipitaciones.

En la parte C y D de la Figura 6.45 se observa la evolución del C orgánico frente a los distintos escenarios climáticos para dos de las situaciones analizadas en el establecimiento del Sr. Rodrigo. En el caso de [Roc1], se observa el mismo tipo de respuesta y de magnitud semejante que la observada para Las Taguas. En cambio, en [Roc2] el contenido de C orgánico se incrementa con cualquiera de los dos escenarios climáticos planteados, respecto de su contenido bajo el clima actual (Tabla 6.4).

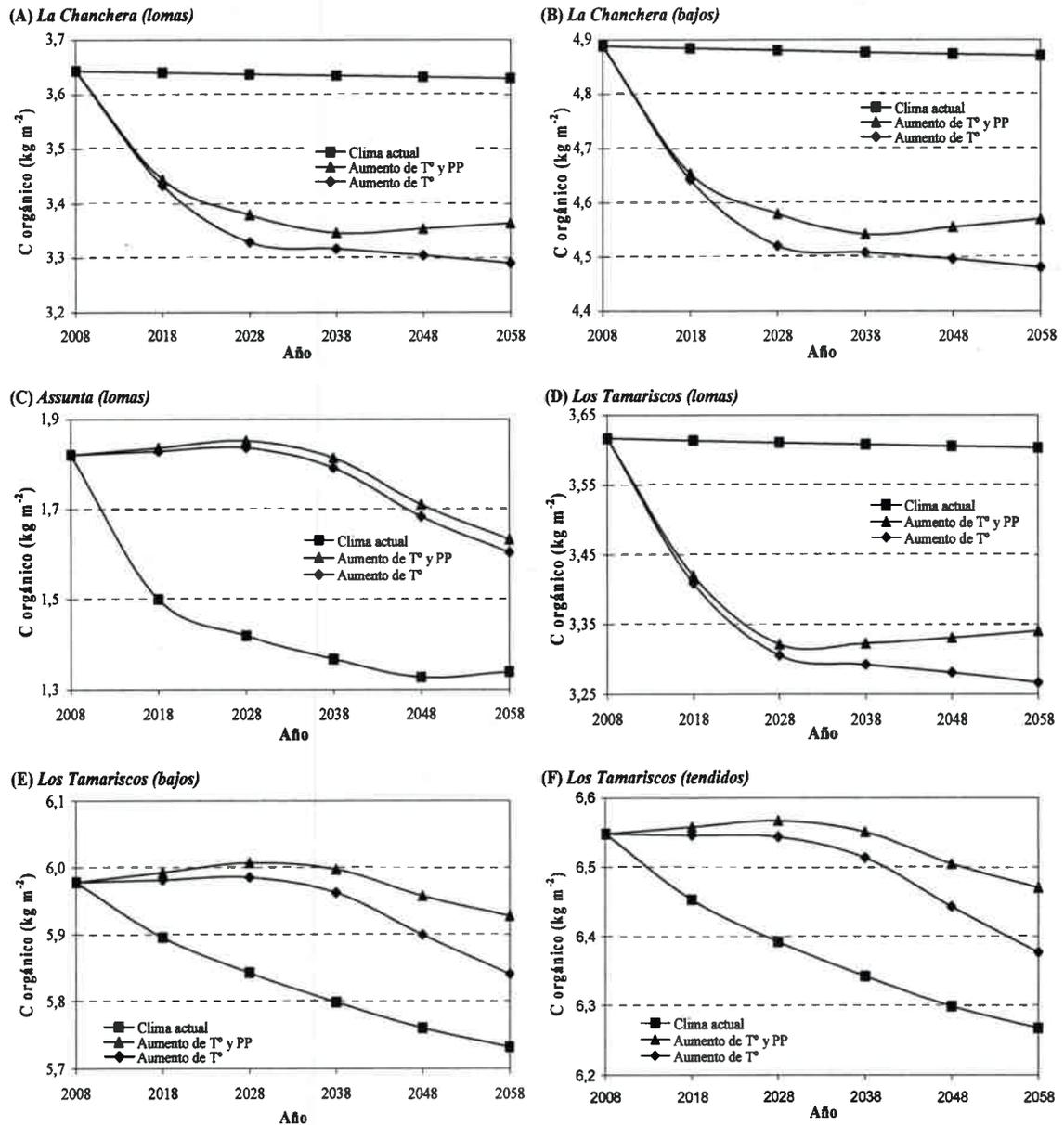


Figura 6.46: Evolución de la cantidad de C orgánico en el horizonte superficial (0 - 20 cm) de los suelos de la Llanura Mal Drenada bajo distintos escenarios de cambio climático. (A) La Chanchera lomas, (B) La Chanchera bajos [LCh3], (C) Assunta lomas, (D) Los Tamariscos lomas, (E) Los Tamariscos bajos y (F) Los Tamariscos (tendidos). Los símbolos cuadrados indican la evolución del C orgánico durante los próximos 50 años bajo las condiciones climáticas actuales. Los símbolos romboidales indican la posible evolución del C orgánico si las temperaturas aumentaran 2 °C, y los símbolos triangulares indican su posible evolución con un incremento de 2 °C en las temperaturas y 20 % en las precipitaciones.

En los sitios pertenecientes a la Llanura Mal Drenada, se observan diferentes tipos de respuesta frente al cambio climático (Figura 6.46), aunque en ningún caso, se presentan diferencias significativas en el contenido de C orgánico entre ambos

escenarios planteados. Por un lado, Assunta y Los Tamariscos (tanto en las lomas como en los bajos), que con cualquiera de los escenarios de cambio climático incrementarían su contenido de C orgánico, respecto del contenido bajo las condiciones climáticas actuales, en una magnitud semejante entre ellos, cuando son expresados en términos absolutos, pero muy diferentes cuando los mismos son expresados en términos relativos al contenido actual (Tabla 6.4).

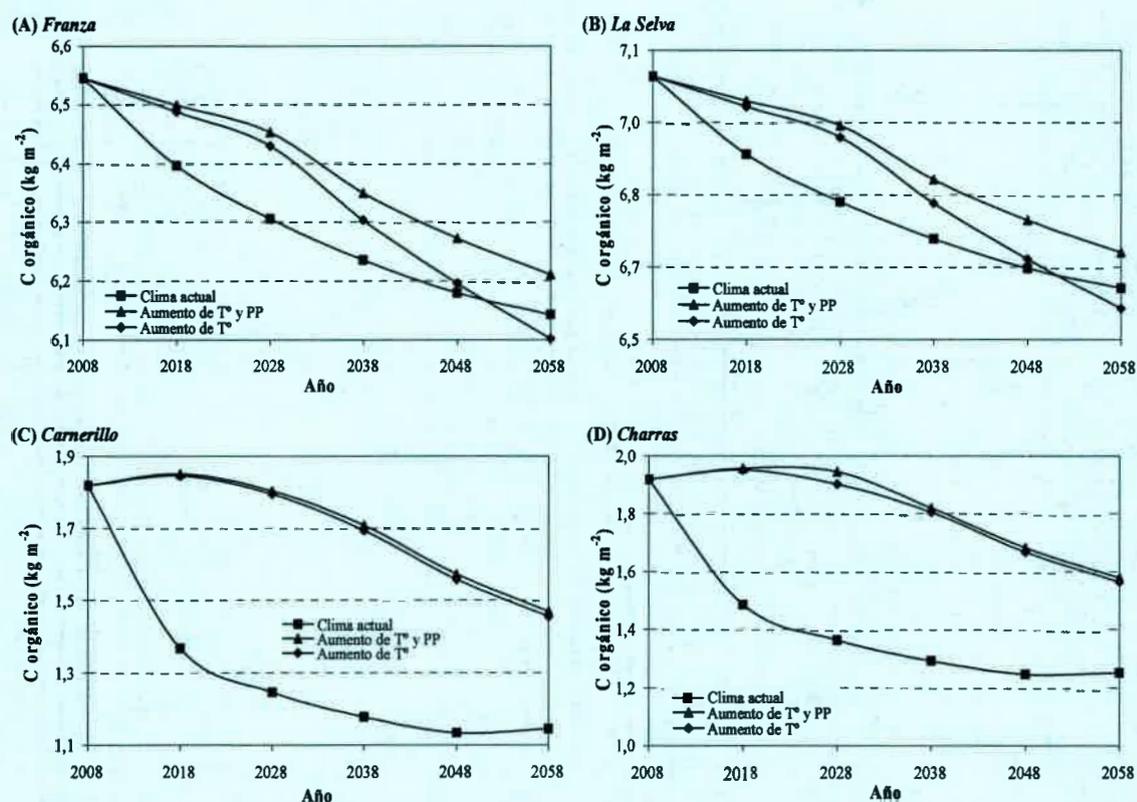


Figura 6.46: Evolución de la cantidad de C orgánico en el horizonte superficial (0 - 20 cm) de los suelos de la Llanura Bien Drenada bajo distintos escenarios de cambio climático. (A) Franza, (B) La Selva [LSm], (C) Carnerillo y (D) Charras. Los símbolos cuadrados indican la evolución del C orgánico durante los próximos 50 años bajo las condiciones climáticas actuales. Los símbolos romboidales indican la posible evolución del C orgánico si las temperaturas aumentaran 2 °C, y los símbolos triangulares indican su posible evolución con un incremento de 2 °C en las temperaturas y 20 % en las precipitaciones.

Por otro lado, en La Chanchera (loma y bajo) y en Los Tamariscos (loma), se produciría un descenso del contenido de C orgánico bajo cualquiera de los escenarios de cambio climático, del orden del 8 % en promedio, respecto al que tendrían bajo el clima actual (Tabla 6.4).

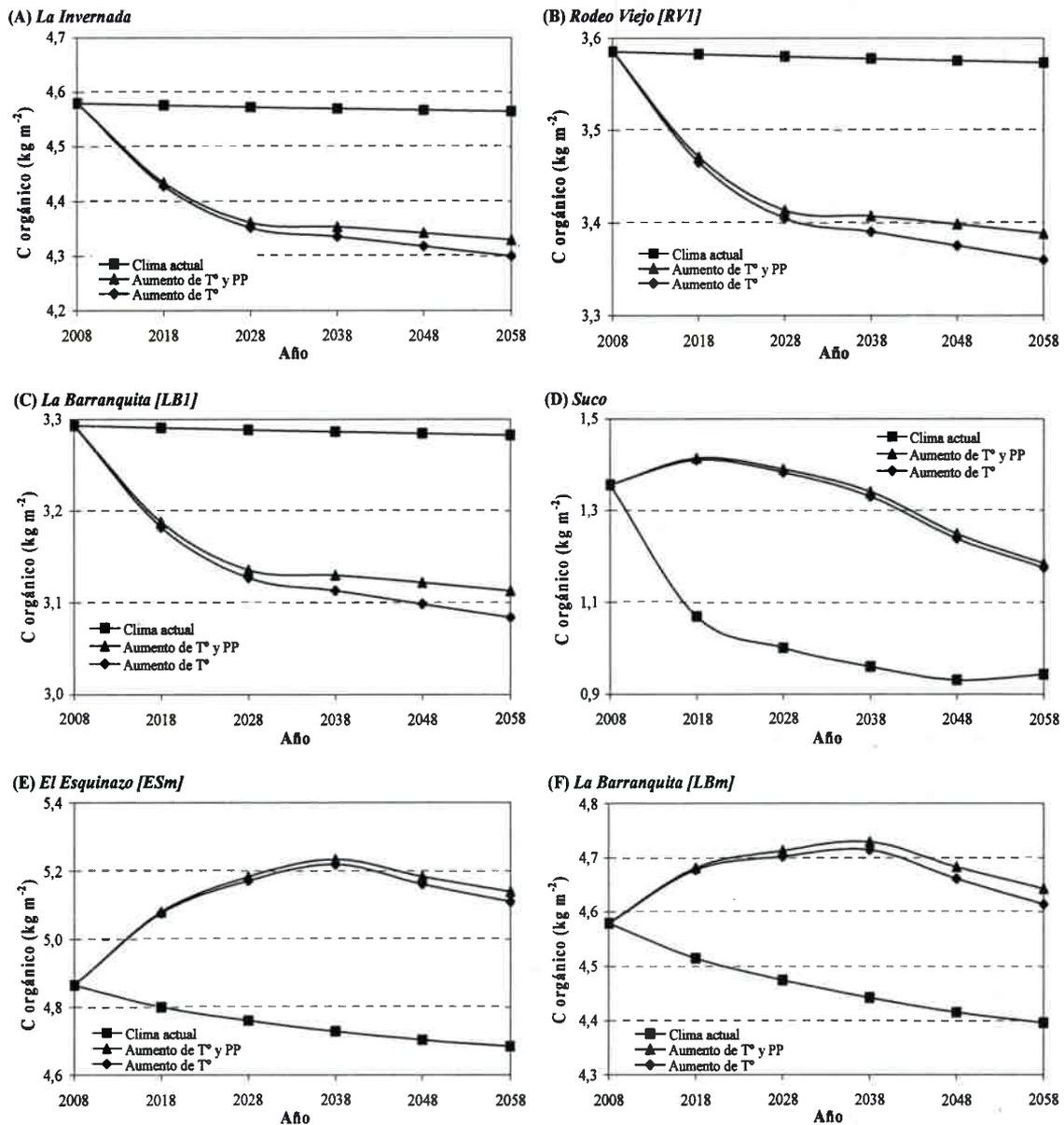


Figura 6.47: Evolución de la cantidad de C orgánico en el horizonte superficial (0 - 20 cm) de los suelos del sector Ondulado de la Llanura Bien Drenada bajo distintos escenarios de cambio climático. (A) La Invernada, (B) Rodeo Viejo [RV1], (C) La Barranquita [LB1], (D) Suco, (E) El Esquinazo [ESm] y (F) La Barranquita [LBm]. Los símbolos cuadrados indican la evolución del C orgánico durante los próximos 50 años bajo las condiciones climáticas actuales. Los símbolos romboidales indican la posible evolución del C orgánico si las temperaturas aumentaran 2 °C, y los símbolos triangulares indican su posible evolución con un incremento de 2 °C en las temperaturas y 20 % en las precipitaciones.

En Franza y La Selva, dos sitios pertenecientes a la Llanura Bien Drenada con uso actual ganadero, ninguno de los escenarios climáticos utilizados en las simulaciones provocó una variación significativa del contenido en el C orgánico, respecto al que tendrían si se mantuviera el clima actual (Figura 6.47).

En cambio, para los puntos de muestreo de Carnerillo y Charras, sitios con uso actual agrícola-ganadero, se observa que con cualquiera de los escenarios climáticos planteados, se produciría un marcado incremento del C orgánico, superando el 25 % en relación al contenido bajo el clima actual (Tabla 6.4).

En el sector Ondulado de la sub-región la Llanura Bien Drenada, los sitios con uso actual agrícola-ganadero y aquellos con uso ganadero en los que fue eliminado el monte nativo (Figura 6.48), con los diferentes escenarios climáticos planteados, se observaría un incremento del 5 a más del 25 % en el contenido de C orgánico, respecto a su contenido bajo clima actual (Tabla 6.4). En cambio, en aquellos sitios en los que el uso actual es exclusivamente ganadero, ambos escenarios de cambio climático provocarían una disminución del contenido de C orgánico, respecto del contenido bajo el clima actual, sin diferenciarse entre ellos.

Independientemente de la discriminación realizada aquí entre las distintas sub-regiones geomorfológicas, al analizar en general, el impacto del cambio climático sobre la evolución del C orgánico edáfico, se observa que cualquiera de los dos escenarios posibles planteados, incrementaría el contenido de C orgánico de los sitios con uso actual agrícola o agrícola-ganadero en más del 20 % en promedio, respecto a su contenido bajo las condiciones climáticas actuales (Tabla 6.4). En cambio, aquellos sitios con uso actual exclusivamente ganadero, sufrirían una disminución en el contenido de C orgánico del 1 %.

Estos resultados podrían deberse a que el incremento en las temperaturas y las precipitaciones ejercen efectos sobre los cultivos agrícolas, incrementando la producción de biomasa que luego es transformada en materia orgánica edáfica. En cambio, la vegetación nativa de la región, mucho más diversa y más adaptada a las fluctuaciones periódicas de las condiciones naturales, no se verían afectadas por el cambio climático, por lo menos dentro del rango de variación estimado por el IPCC (2007).

6.4 Secuestro de CO₂ atmosférico y calidad ambiental

El suelo es el principal reservorio de C en la superficie de La Tierra, conteniendo 1500 Pg C, más de tres veces el contenido presente en la vegetación terrestre (Schlesinger, 1997). Los suelos agrícolas contienen alrededor de 170 Pg C en el metro superficial (Cole *et al.*, 1996).

Por otra parte, los suelos agrícolas también pueden contribuir en el almacenaje del CO₂ atmosférico dentro de la materia orgánica edáfica. El secuestro de C en los suelos agrícolas puede ser incrementado con la implementación de diferentes prácticas de manejo, como la siembra directa, la rotación de cultivos, la fertilización, etc. (Paustian *et al.*, 1997; 2000; Smith, 2004; Ogle *et al.*, 2005). El potencial de los suelos agrícolas a nivel mundial para secuestrar C a través de tales prácticas de manejo fue estimado en 600-900 Tg C año⁻¹ (Cole *et al.*, 1996). De acuerdo al IPCC (2000), el incremento potencial en el contenido de C debido a las mejoras en el tipo de uso y manejo de las tierras, podría ser de 125 Tg C año⁻¹ bajo cultivos anuales y muy superior a los 200 Tg C año⁻¹ teniendo en cuenta todas las tierras de uso agrícola-ganadero (incluyendo tierras de pastizales y silvo-pastoriles).

Los sistemas de labranza conservacionistas mantienen en superficie mayor cantidad de residuos vegetales que los sistemas de labranza tradicionales, además de poseer mayores contenidos de C cercanos a la superficie (Drury *et al.*, 1999). Asimismo, en los sistemas conservacionistas existe una lenta descomposición de los restos vegetales, debido al menor contacto entre el resto vegetal y el suelo, comparado con una situación de labranza convencional donde los residuos de las plantas son incorporados completamente. El cambio desde sistemas de labranza convencionales a sistemas conservacionistas en las tierras de cultivo tiene el potencial para incrementar el C orgánico del suelo y de esta forma mitigar el calentamiento global (Freibauer *et al.*, 2004; Lal, 2004; West & Post, 2002).

La variación en el contenido de C producida por los cambios en el uso y manejo de los suelos es estimada por el IPCC (1997; 2003) a partir de la ecuación:

$$\Delta CC = [(CC_0 - CC_{0-T})]/D$$

Donde:

$$CC = \sum_c \sum_s \sum_i CC_R \times F_U \times F_M \times F_I \times A$$

Donde ΔCC es la variación anual del contenido de C edáfico (Mg C año^{-1}); CC_0 es el contenido de C orgánico del suelo en el último año del período con el uso y manejo actual (Mg C ha^{-1}); CC_{0-T} es el contenido de C orgánico del suelo T años anteriores al último año del período (Mg C ha^{-1}); c representa al clima zonal y s al tipo de suelo; i es el sistema de manejo de la tierra definido para cada país; A es la superficie considerada (ha); CC_R es el contenido de C de referencia (Mg C ha^{-1}); F_U es el factor de variación en el contenido por el tipo de uso de la tierra (adimensional); F_M es el factor de variación en el contenido por el régimen de manejo/disturbio (adimensional); F_I es el factor de variación en el contenido por el nivel de ingreso de C (adimensional) y D es el período de tiempo para alcanzar el nuevo equilibrio en el contenido de C en función de los factores que controlan su variación (20 años por *default*).

Estimaciones realizadas en los Estados Unidos utilizando el modelo Century, dieron como resultado que los suelos minerales de tierras de cultivos son un destino neto de más de 21 Tg C año^{-1} , las que resultan mucho más elevadas (11 Tg C año^{-1}) que las obtenidas a partir de la ecuación del IPCC (USEPA, 2004).

En la región pampeana, Steinbach y Álvarez (2006), reportaron incrementos promedios del C orgánico edáfico $4,35 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ superiores bajo siembra directa que bajo labranza convencional. Este aumento en el contenido del C orgánico fue superior para suelos con bajos niveles iniciales de materia orgánica y de regiones más secas (15 % para suelos con 20 Mg C ha^{-1} y 5 % para suelos con 80 Mg C ha^{-1}).

Teniendo en cuenta que la región pampeana Argentina abarca aproximadamente unas 50 Mha, y que el 50 % de esa superficie se encuentra en la actualidad bajo siembra directa, Steinbach y Álvarez (2006), estimaron que con sólo convertir el área cultivada restante a siembra directa, se incrementaría el C orgánico edáfico en 74 Tg, lo que representa el doble de la emisión anual de C debida al consumo de combustibles fósiles en la Argentina (INDEC, 2003).

Otros autores (Six *et al.*, 2002; West & Post, 2002) reportaron que los suelos agrícolas presentan la capacidad de secuestrar C atmosférico a través de la conversión de sistemas de labranza convencionales a siembra directa, con tasas del orden de los $325 - 480 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, hasta alcanzar un *plateau* en niveles de C edáfico entre 2,9 y 12 Mg ha^{-1} (Álvarez, 2005; Paustian *et al.*, 1997; Six *et al.*, 2002). Como consecuencia de estas tendencias, los suelos agrícolas de la región pampeana Argentina presentarían bajo

potencial de secuestro de C atmosférico, no superando el 6 % del contenido de C edáfico actual (Álvarez, 2005).

Ogle & Paustian (2005), observaron que con la implementación de prácticas conservacionistas, se acumularon 10,8 Tg C año⁻¹ entre 1982 y 1997, en los primeros 30 cm de los suelos agrícolas. Estos mismos autores desarrollaron un índice de calidad ambiental, considerando como valor del 100 % de dicho índice, al contenido de C orgánico de los suelos en su condición natural, y como valor del 0 % a su contenido bajo labranza convencional. A partir de un inventario de los suelos agrícolas de los Estados Unidos realizado en 1997, estimaron un stock de C de 22400 Tg, lo que representa un índice de calidad ambiental superior al 60 %.

En la Tabla 6.5 se observan los índices de calidad ambiental de los sitios seleccionados en este capítulo, calculados a partir de la metodología propuesta por Ogle y Paustian (2005). El índice de calidad ambiental promedio de los sitios seleccionados es de 46,2 %, muy por debajo del calculado para los suelos agrícolas de los Estados Unidos.

En la sub-región de la Sierra y el Pedemonte, a pesar de que ambos sitios se encuentran bajo uso ganadero exclusivo, los valores del índice de calidad ambiental presentan una gran diferenciación entre ellos (33,5 – 90,9 %), como consecuencia del desmonte de la vegetación natural.

Los valores de los índices de calidad ambiental de los sitios de la Llanura Medanosa, muestran la mayor amplitud entre las sub-regiones estudiadas, variando desde 15,3 % para Rodrigo [Roc2] hasta 99,9 % para Lavaisse. Luego de 50 años de agricultura, Rodrigo [Roc2] presenta un marcado estado de deterioro ambiental, y con un manejo silvo-pastoril, Lavaisse se encuentra prácticamente en estado natural. Considerando todas las situaciones analizadas, estos dos puntos de muestreo presentan el menor y el mayor índice de calidad ambiental, respectivamente (Tabla 6.5), demostrando la gran fragilidad de esta sub-región frente al desmonte y las prácticas agrícolas.

En la sub-región Mal Drenada, los valores de los índices de calidad ambiental obtenidos, pueden dividirse en dos grupos. Por un lado, el grupo de los sitios con uso actual agrícola-ganadero y aquellos uso ganadero exclusivo pero que han sido desmontados, con valores entre 23,5 y 30,3 %. Por otro lado, el grupo de los sitios con

uso actual ganadero pero que no han sido desmontados, con valores del índice de calidad ambiental superiores al 90 % (Tabla 6.5).

La sub-región de la Llanura Bien Drenada, presenta el rango de índices de calidad ambiental más estrecho (27,4 – 33,4 %), a pesar de tratarse de sitios bajo uso actual tanto ganadero exclusivo como rotaciones agrícolas-ganaderas (Tabla 6.5). Este sector del centro sur de la provincia de Córdoba, fue el primero en ser ocupado por los colonos y por ende, es el que proviene de una historia agrícola de más duración. Por tal motivo, es lógico que sea el sector que presente, en promedio, los valores más bajos de calidad ambiental.

El valor de los índices de calidad ambiental del sector Ondulado presenta la misma tendencia que en la Llanura Mal Drenada, con valores cercanos al 25 % en condiciones agrícolas-ganaderas y ganaderas posteriores al desmonte, y con valores superiores al 90 % para las situaciones con pastoreo sobre el monte nativo (Tabla 6.5).

Tabla 6.5: Índice de calidad ambiental para los sitios seleccionados.

Sub-región	Sitio	Código	C orgánico superficial (g m ⁻²)			Índice de calidad ambiental	
			Actual	“natural”	“agrícola”	natural-agrícola	(%)
Sierra y Pedemonte	Valles medios	<i>Vam1</i>	8866	15878	5338	10539	33,5
	Valles pronunciados	<i>Vap1</i>	15257	16118	6708	9410	90,9
Llanura Medanosa	Lavaise	<i>Lvm</i>	10297	10301	2684	7617	99,9
	Las Taguas	<i>LTm2</i>	5480	9923	2093	7830	43,3
	Rodrigo	<i>Roc1</i>	7001	11573	2938	8636	47,0
	Rodrigo	<i>Roc2</i>	4080	11594	2720	8874	15,3
Llanura Mal Drenada	Assunta (lomas)	<i>Asl</i>	1822	3938	1171	2767	23,5
	La Chanchera (lomas)	<i>LCh1</i>	3643	3865	1192	2673	91,7
	Los Tamariscos (lomas)	<i>LT1</i>	3617	3839	1167	2672	91,7
	Los Tamariscos (tendidos)	<i>LT2</i>	6548	13513	3516	9997	30,3
	Los Tamariscos (bajos)	<i>LT3</i>	5978	12510	3222	9288	29,7
	La Chanchera (bajos)	<i>LCh3</i>	4889	5126	1661	3465	93,2
Llanura Bien Drenada	Franza	<i>Frm</i>	6546	13475	3202	10272	32,5
	La Selva	<i>LSm</i>	7046	14156	3473	10684	33,4
	Carnerillo	<i>Car</i>	1819	4015	982	3033	27,6
	Charras	<i>Chr</i>	1918	4143	1077	3065	27,4
Llanura Ondulada	El Esquinazo	<i>Esm</i>	4865	11720	2636	9084	24,5
	La Barranquita	<i>LBm</i>	4579	11066	2304	8762	26,0
	La Barranquita	<i>LB1</i>	3293	3507	942	2564	91,7
	La Invernada	<i>LIn</i>	4579	4839	1432	3407	92,4
	Rodeo Viejo	<i>RV1</i>	3586	3801	1095	2706	92,0
	Suco	<i>Suc</i>	1356	3400	841	2559	20,1

Capítulo 7: Discusión general, recomendaciones y conclusiones

La evaluación de la sustentabilidad de los agroecosistemas exige reunir ciertas características deseables en materia de indicadores: (a) las mediciones deben ser técnicamente factibles y fáciles de realizar, (b) deben concentrarse sobre aquellas variables relevantes ante las cuales el sistema estudiado muestra una particular sensibilidad, (c) deben ser representativas en términos de cobertura geográfica, (d) deben facilitar su incorporación a series temporales que permitan examinar cambios ocurridos en la calidad de los recursos naturales a través del tiempo, (e) deben permitir diferenciar claramente las causas de los efectos, y (f) deben ser poco costosas y, hasta donde sea posible, eficaces en el aprovechamiento de información disponible.

La materia orgánica del suelo resulta ser un adecuado indicador de la sustentabilidad de la componente edáfica de los sistemas productivos, a través de su cuantificación en el estado estacionario natural del sistema, y como expresión del grado de deterioro del sistema bajo las condiciones actuales.

El análisis en términos cuantitativos de la evolución de la materia orgánica bajo diferentes situaciones de uso y manejo de las tierras en las distintas sub-regiones estudiadas en este trabajo, permite estimar el impacto que las mismas ejercen sobre la calidad y salud edáfica de los agroecosistemas, de acuerdo a las características particulares de resistencia y resiliencia de cada una de ellas. La utilización de modelos de simulación en el análisis y cuantificación de la evolución de la materia orgánica edáfica bajo condiciones locales permite un gran ahorro de recursos (tiempo y dinero) en la investigación y transferencia de conocimientos.

La gran mayoría de los modelos de simulación de materia orgánica actualmente en uso fueron desarrollados y validados bajo las condiciones del Hemisferio Norte. Según lo expresado en este trabajo acerca de la importancia de la materia orgánica edáfica como índice de los factores calidad y salud del suelo -condicionantes de la sustentabilidad de los sistemas productivos-, la validación del modelo Century frente a las condiciones ambientales locales y a las tecnologías adoptadas en la región, constituye un importante aporte al conocimiento.

En la evaluación y monitoreo de la sustentabilidad de los agroecosistemas a partir de la calidad de los suelos, debe prestarse especial atención a la variación a través del tiempo de la cantidad y calidad de la materia orgánica, regulada ecológica y antrópicamente, para las diferentes condiciones medioambientales. En este sentido, los análisis realizados para cada una de las sub-regiones, en especial para la llanura mal drenada, han demostrado el efecto que las condiciones de intrazonalidad pueden tener sobre la distribución del C orgánico en el suelo y en el paisaje. Por este motivo, la utilización del modelo Century como herramienta para la evaluación y monitoreo de calidad de los suelos debe limitarse a su estudio en condiciones zonales, o considerar una etapa previa de validación del modelo frente a datos locales y complementarse con otras herramientas predictivas de mayor sensibilidad.

Un indicador de salud del suelo debe reflejar el estado actual de determinado atributo respecto del valor 'esperable' de dicho atributo, en términos relativos. La utilización como valor de referencia de los valores correspondientes a la situación 'original' resulta demasiado alejada de la realidad, generando indicadores de salud del suelo 'utópicos'. Los valores 'esperables' deben ser aquellos derivados con modelos empíricos desarrollados a partir de gradientes regionales para condiciones zonales.

La simulación bajo distintos escenarios futuros de uso y manejo de las tierras permite predecir la evolución del contenido y calidad de la materia orgánica, y establecer rangos de referencia para la elección de sistemas de manejos productivos y estables, y por ende sustentables. Si bien no es posible en forma práctica, ni esperable desde el punto de vista económico – productivo alcanzar los niveles de carbono orgánico presentes en el estado estacionario natural, puede estimarse a través de la simulación, el rango hasta el cual su contenido puede incrementarse y estabilizarse.

Si bien en las últimas versiones del modelo Century, es posible realizar simulaciones bajo diferentes prácticas de manejo (rotaciones de cultivos, sistemas de labranza, nivel de fertilización, etc.), las mismas están pre-determinadas en el modelo, y no se encuentra una cantidad de opciones suficientes como para cubrir todo el espectro de variación en el manejo los agroecosistemas de la región bajo estudio. Por otra parte, la utilización de estas diferentes prácticas de manejo, sólo genera respuestas importantes en cuanto a la variación del contenido de materia orgánica, cuando se realizan simulaciones de largo plazo.

A partir de esas observaciones, y teniendo en cuenta que las diferentes prácticas de manejo implementadas por los productores son modificadas continuamente como consecuencia de su fuerte dependencia de condiciones macroeconómicas cambiantes por un lado, y del avance tecnológico por el otro, se desprende que en la evaluación de la sustentabilidad de determinadas prácticas de manejo es necesario complementar el uso del modelo Century con otros más sensibles a la dinámica del C orgánico en el corto plazo (incluso modelos empíricos desarrollados localmente).

A partir de la baja sensibilidad que presenta el Century para el C orgánico total en simulaciones de corto plazo, es necesario considerar sus variaciones cualitativas. El modelo discrimina el C orgánico entre diferentes “fracciones” denominadas “activa”, “estable” y “pasiva”. Conceptualmente, serían coincidentes con el fraccionamiento físico del C orgánico, que discrimina según la granulometría (C particulado) o la densidad (C liviano), asociado al diferente grado de protección generado por las partículas minerales del suelo. Pero desde un punto de vista práctico, las fracciones simuladas por el modelo Century no son cuantificables en laboratorio, por lo que sería conveniente desarrollar modelos predictivos de la evolución de las fracciones del C orgánico para las cuales se cuenta con apropiada metodología de análisis y abundantes antecedentes de experimentación local.

Un análisis integral de la sustentabilidad debe contemplar aspectos ambientales, sociales y económicos del sistema bajo estudio. De allí que, para el análisis de escenarios futuros, es necesario además contar con modelos de simulación de cultivos validados regionalmente que involucren tales aspectos y que puedan ser fácilmente vinculados con los resultados del Century. Ciertos análisis físicos (balance de C) y/o económicos (margen bruto) relativamente simples pueden ser llevados a cabo a partir de los resultados obtenidos mediante simulación para escenarios futuros, a fin de complementar su información en el monitoreo y evaluación de sustentabilidad.

7.1 Conclusiones

A partir de de los resultados expuestos y discutidos en los capítulos y secciones precedentes, se desprenden las siguientes conclusiones:

1- Diferentes historias de uso y sistemas de manejo de las tierras afectan de distinta manera la cantidad de materia orgánica edáfica presente en el estado estacionario actual, de acuerdo a las características de los factores que condicionan la génesis de los suelos de las diferentes sub-regiones (textura, clima, vegetación, relieve) que determinan en parte, la resistencia y resiliencia del sistema. Por tal motivo, se acepta la hipótesis 1.

2- El nivel de variación en el contenido de materia orgánica y la sensibilidad de este indicador dependen del grado de deterioro del sistema alcanzado al momento de aplicar determinado manejo, respecto a su estado estacionario natural. Se acepta la hipótesis 2, debido a que los sistemas antrópicamente menos disturbados, fueron mucho más sensibles que aquellos con larga tradición agrícola, frente al mismo sistema de manejo.

3- El modelo Century es una herramienta adecuada para simular la evolución del contenido de materia orgánica en la porción superficial del suelo desde el estado estacionario natural hasta la situación actual en tierras bajo diferentes historias de uso y manejo para diferentes condiciones edafoclimáticas zonales. Sin embargo, el modelo no simula el contenido de C orgánico de manera adecuada en condiciones de intrazonalidad, y por tal razón, se rechaza la hipótesis 3.

4- El uso del modelo Century permite estudiar la interacción entre los factores ambientales y antrópicos que llevaron al sistema a su estado estacionario actual y establecer rangos de valores de referencia, necesarios para su utilización como forma de expresión del grado de deterioro de los agroecosistemas. Se acepta la hipótesis 4.

5- Las variaciones en el contenido y calidad de la materia orgánica edáfica frente a diferentes alternativas futuras de uso y manejo de las tierras, pueden ser predichas de manera aceptable por el modelo Century, para cada una de las sub-regiones bajo estudio. Con la salvedad realizada para los sitios condicionados por factores de intrazonalidad, el modelo predice adecuadamente, y por ende, se acepta la hipótesis 5.

6- El uso del modelo Century permite predecir las variaciones en el contenido y calidad de la materia orgánica edáfica frente a diferentes escenarios de cambio climático global, para cada una de las sub-regiones bajo estudio. Se acepta la hipótesis 6.

7- A partir de las simulaciones realizadas con el modelo Century, es posible estimar la capacidad de secuestro de CO₂ atmosférico en los suelos de la región bajo

estudio, para diferentes escenarios futuros de uso y manejo de las tierras, y calcular un índice de calidad ambiental, por lo cual, se acepta la hipótesis 7.

Sin embargo, en la evaluación del comportamiento de los suelos frente a distintos escenarios de cambio climático global y de su capacidad para secuestrar CO₂ atmosférico a partir de los diferentes esquemas de uso y manejo de las tierras planteados en este trabajo a escala local-regional, queda pendiente el análisis del balance de C a una mayor escala, asumiendo el gasto energético global del sistema de producción. En un balance de este tipo, aplicado a los cambios producidos en el uso y manejo de las tierras en los últimos años en la región pampeana Argentina, hay que considerar por ejemplo, que el aumento en la superficie sembrada bajo siembra directa se produjo “de la mano” de un importante incremento en el uso de fertilizantes (principalmente de urea), y sus implicancias energéticas. Por último, en una evaluación integral de la sustentabilidad, los agroecosistemas deben ser re-diseñados en función de las necesidades de los diferentes actores involucrados teniendo en cuenta aspectos sociales, económicos y políticos. El modelo Century, complementado con otras herramientas metodológicas de evaluación a diferentes escalas espacio-temporales, puede ser de gran utilidad en el definición de políticas a escala regional.



Bibliografía citada

- Agencia Córdoba DACyT SEM – INTA Manfredi.** 2003. Recursos Naturales de la Provincia de Córdoba. Los Suelos. Nivel de Reconocimiento. Escala 1:500.000. 567 pp.
- Alessandria, E., H. Leguía, L. Pietrarelli, J. Sánchez, S. Luque, M. Arbornó, J.L. Zamar y D. Rubin.** 2001. La agrodiversidad en sistemas extensivos. El caso de Córdoba. *LEISA*, 16: 10-11.
- Altieri, M.A., D.K. Letourneau and J.R. Davis.** 1983. Developing sustainable systems. *Bioscience*, 33, 45-49.
- Álvarez, R.** 2005. A review of nitrogen fertilizer and conservation tillage effects on soil carbon storage. *Soil Use Manage*, 21: 38-52.
- Álvarez, R.** 2006. Materia orgánica. Valor agronómico y dinámica en suelos pampeanos. Editorial Facultad de Agronomía (UBA), 206 pp.
- Álvarez, C. y E. Mulín.** 2004. El gran libro de la siembra directa. Enciclopedia de la nueva agricultura. FAUBA-Clarín. Buenos Aires. 232 pp.
- Álvarez, R., O.J. Santanatoglia and R. García.** 1995. Soil respiration and carbon input from crops in a wheat-soybean rotation under different tillage systems. *Soil Use Manag*, 11, 45-50.
- Anderson, D.L.** 1981. Receptividad del pastizal natural. Establecimiento “Aguada del Molle”. Informe CREA El Morro II. Provincia de Córdoba. 3 pp.
- Anderson, D.L., J.A. Del Águila y A.E. Bernardon.** 1970. Las formaciones vegetales de la Provincia de San Luis. *Rev. Inv. Agrop. INTA Serie 2. Biol y Prod. Veg.*, 7: 153-183.
- Anderson, D.L., E.L. Orione y H.B. Molinero.** 1980. Determinación de la carga animal en tres áreas del pastizal natural de San Luis. EEA Villa Mercedes, INTA. 12 pp.
- Apezteguía, H. y R. Sereno.** 2002. Influencia de los sistemas de labranza y calidad de carbono orgánico del suelo. *Agricultura Técnica*, 62(3): 418-426.
- Barcnas, R.** 1992. Cultura Indígena de la Patagonia. Ed. V Centenario. 400 pp.
- Barrionuevo, V.** 1986. Historia de Río Cuarto. Tomo I: 190 pp.; Tomo II: 220 pp.; Tomo III: 200 pp.

- Becerra, V., A. Cantero, A. Piñeiro, E. Bricchi y H. Gil.** 1981. Planificación del manejo conservacionista de una subcuenca de erosión hídrica del Departamento de Río Cuarto. *Escuela para graduados UNRC*, 19 pp.
- Becerra, V., A. Cantero, A. Piñeiro, y E. Bricchi.** 1983. Planeamiento del manejo conservacionista de una subcuenca de erosión hídrica del Departamento de Río Cuarto. *Actas de la I Jornadas Científico-Técnicas FAV*, p. 50.
- Bennema, J.** 1966. Classification of Brazilian Soils. FAO, EPTA 2197.
- Bertalanffy von, L.** 1963. General Systems Theory. Foundations, Development Applications. *Ed. George Brasiller*, New York, 325 pp.
- Bianco, C., T.A. Kraus, D.L. Anderson y J.J. Cantero.** 1987. Formaciones Vegetales del suroeste de la provincia de Córdoba (Argentina). *Rev. UNCR*, 7(1): 5-66.
- Boekel, P.** 1986. Effect of organic matter on soil structure (In Dutch). Themadag "Organische stof in de akkerbouw", PAGV Lelystad, *Themaboekje*, 7: 44-53.
- Bonadeo, E. y E. Bricchi.** 1983. Caracterización física de los Udoles del oeste de Río Cuarto. *Actas de la I Jornadas Científico-Técnicas FAV*, p. 17.
- Bonadeo, E. y E. Bricchi.** 1991. Informe técnico: Contenido de materia orgánica, nitratos, P, Ca, Mg y K a la siembra de colza, en el área de General Deheza y Santa Eufemia.
- Bricchi, E.** 1995. Condición física de los suelos del Centro de Córdoba. RELATO. *Actas de la Reunión Nacional del Comité de Física de suelos de la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo*, 11-12.
- Bricchi, E.** 1996. Relaciones entre la compactación, morfología y propiedades físicas en un Hapludol típico de Río Cuarto. Tesis Magíster Scientiae en Ciencias del Suelo. Facultad de Agronomía y Veterinaria. Universidad de Buenos Aires. Argentina. 163 pp.
- Bricchi, E., A. Cantero, y E. Bonadeo.** 1991. Caracterización física de los principales subgrupos de suelos y su relación con cultivos y sistemas de labranzas en el suroeste de Córdoba. *Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo*. 21-22.
- Bricchi, E., J.M. Cisneros, F. Formía, M. Uberto, M. Gimenez y P. Talano.** 1999. Informe: Programa de evaluación de suelos en siembra directa: Caracterización condición química de los suelos. 4 pp. Estancia Las Lomas, Villa Valeria, Córdoba.
- Bricchi, E., F. Formia, G. Espósito, L. Riberi and H. Aquino.** 2004. The effect of

- topography, tillage and stubble grazing on soil structure and organic carbon levels. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 2: 409-418.
- Cabrera, A.L.** 1971. Fitogeografía de la República Argentina. *Boletín Sociedad Argentina de Botánica*, 14(1-2): 1-42.
- Cabrera, A.L.** 1976. Regiones fitogeográficas argentinas. *Enciclopedia Argentina de Agricultura y Ganadería. Fasc.*, 1: 1-85.
- Calegari, A., M.R. Darolt and M. Fero.** 1998. Towards sustainable agriculture with a no-tillage system. *Advances in GeoEcology*, 31: 1205-1209.
- Cambardella, C. and E. Elliot.** 1992. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56: 777-783.
- Campbell, C.A.** 1978. Soil organic carbon, nitrogen and fertility. p. 173-272. In M. Schnitzer and S.U. Khan (Ed.) *Soil organic matter*. Elsevier Scientific Publ. Co. Amsterdam.
- Campbell, L.C., W.W. Heck, D.A. Neher, M.J. Munster and D.L. Hoag.** 1992. Biophysical measurements of the sustainability of temperate agriculture. Public. the Environmental Monitoring and Assessment Program (EMAP). Agroecosystems Resource Group, U.S. *Environmental Protection Agency*, 40 pp.
- Cantero, J.J.** 1993. La vegetación y su relación con factores ambientales en paisajes hidrohalmórficos. Tesis Magíster Scientiae en Recursos Naturales, Universidad Nac. Buenos Aires, Argentina.
- Cantero, J.J. y C. Bianco.** 1986a. Las plantas vasculares del suroeste de la Provincia de Córdoba. III. Catálogo preliminar de las especies. *Rev. Univ. Nac. de Río Cuarto*, 6(1): 5-52.
- Cantero, J.J. y C. Bianco.** 1986b. Las plantas tóxicas del sur de la provincia de Córdoba (Argentina). IDIA. (INTA). (453-4): 9-63.
- Cantero, A., E. Bricchi, V. Becerra, J.M. Cisneros y H. Gil.** 1986. Zonificación y descripción de las tierras del Departamento de Río Cuarto. Talleres gráficos de la UNRC, adhesión del Bicentenario de la Fundación de la ciudad de Río Cuarto. 80 pp. y una carta.
- Cantero, A., E. Bricchi, V. Becerra, J.M. Cisneros y H. Gil.** 1999. Un índice de aptitud relativa de las tierras con fines catastrales. Aplicación al departamento de Río Cuarto (Córdoba, Argentina). *Prod. Prot. Veg.*, vol. 14 (1), España.

- Cantero, A., E. Bricchi, E. Bonadeo y R. Gallardo.** 1987a. Propiedades físicas de los principales subgrupos de suelos del centro suroeste de Córdoba. *Actas de la II Jornadas Científico-Técnicas FAV - U.N.R.C.*, p. 146.
- Cantero, A., E. Bricchi, J.M. Cisneros y H. Gil.** 1987b. Aplicación de un índice de aptitud relativo de las tierras del Departamento de Río Cuarto. *Actas de la II Jornadas Científico-Técnicas FAV - U.N.R.C.*, p. 143.
- Cantero, A., E. Bricchi, E. Hampp, V. Becerra, M. Cantú, L. De León, I. Moreno, H. Gil, y I. Ponce.** 1983. I. Estudio esquemático de los suelos de la región de Río Cuarto (2.000.000 has). *Actas de la I Jornadas Científico-Técnicas FAV*, p. 14.
- Cantero, A., J.J. Cantero, J.M. Cisneros, M.P. Cantú, S. Degiovanni, V. Becerra, A. Becker, I. Moreno, M. Blarasin y M. Villegas.** 1988a. Propuesta de ordenamiento y manejo integrado de las tierras y aguas en el sur de la Provincia de Córdoba. *Informe UNRC.*, 58 pp. 1 carta 1:250.000.
- Cantero, A. y M. Cantú.** 1980. Algunas consideraciones sobre los suelos y la degradación-recuperación de las tierras en el área de Río Cuarto (Cba.). Comité Arg. Progr. El Hombre y la Biosfera. (MAB). Sem. Internc. sobre deterioro y conservación de los suelos en la cuenca del Plata. Buenos Aires.
- Cantero, A., y M. Cantú.** 1985. Manejo integrado de los recursos naturales para la optimización de su productividad en el centro sur de la Provincia de Córdoba (Argentina). *Rev. Univ. Nac. Río Cuarto*, 4: 173-175.
- Cantero, A., M. Cantú, E. Bricchi, E. Hampp, V. Becerra, E. Bonadeo y I. de Ponce.** 1981. Principales asociaciones de suelos en la cuenca del sistema Arroyo Sta. Catalina- Del Gato- Laguna Tigre Muerto (600.000 has). *Escuela de graduados UNRC.*, 50 pp. y una carta.
- Cantero, A., M.P. Cantú, J.M. Cisneros, J.J. Cantero, M. Blarasin, V. Becerra, J. Gonzalez, A. Degioanni, H. Gil, J. De Prada, S. Degioanni, C. Cholaky, M. Villegas, A. Cabrera y C. Eric.** 1998a. Las tierras y aguas del sur de Córdoba. Propuesta para un manejo sustentable. *Universidad Nacional de Río Cuarto*, 119 pp.
- Cantero, J.J., J.M. Cisneros, A. Cantero, L. Petryna, D. Renna, C. Cholaky, S. Benítez y N. Angeli.** 1988b. Potencialidad del uso de la vegetación natural para el incremento de la productividad de ambientes mal drenados del centro-sur de

Córdoba. Trabajo presentado al Primer Congreso SANCOR de Cooperativismo, Tecnología y Familia, 7-8 de octubre, Córdoba.

- Cantero, J.J., J.M. Cisneros, M. Zobel and A. Cantero.** 1998b. Environmental relationships of vegetation patterns in saltmarshes of central Argentina. *Folia Geobotanica & Phytotaxonomica*.
- Cantero, J.J., J. Giraud, R. Cattana y C. Mena.** 1988c. Intoxicación con *Polygonum convolvulus* L. (enredadera). *Rev. Medicina Veterinaria*, 71(5): 2082-212. Buenos Aires.
- Cantero, J.J. y R. León.** 1996. Comparison of vegetation classifications from Argentine salt marsh landscapes. *Abstracta Botánica*, 20(2): 69-82.
- Cantero, J.J. y R. León.** 1999. The vegetation of saltmarshes in central Argentina. *Beitr. Biol. Pflanzen*, 71: 203-242.
- Cantero, J.J., R. León, J.M. Cisneros and A. Cantero.** 1998c. Habitat structure and vegetation relationships in central Argentina salt marsh landscapes. *Plant Ecology*.
- Cantero, J.J., C. Nuñez, M. Geymonat y G. Chiacchiera.** 1996. Zonificación y descripción de gramíneas de las sierras de Comechingones (Córdoba, Argentina) por caracteres morfológicos. *Revista Parodiana*, 9(1-2): 45-88.
- Cantero, J.J. y L. Petryna.** 1998. La vegetación de los saladares y humedales del centro de Argentina. *Itinera Geobotánica*, 11: 173 – 193.
- Cantú, M.P.** 1998. Estudio geocientífico para la evaluación ambiental y la ordenación territorial de una cuenca pedemontana. Caso: cuenca del arroyo La Colacha, Departamento Río Cuarto, Provincia de Córdoba. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina.
- Cantú, M.P. y A. Cantero.** 1981. Carta de Unidades Fisiográficas de la Cuenca del Sistema A° Santa Catalina-Del Gato-Laguna Tigre Muerto (600.000 ha). *Escuela Graduados UNRC*, mimeograf. 3 pags. 1 carta.
- Cantú, M.P. y S. Degiovanni.** 1984. Geomorfología de la región centro-sur de la provincia de Córdoba. IX Congreso Geológico Argentino. *Actas IV*: 76-92, San Carlos de Bariloche.
- Capitanelli, E.** 1979. Geografía física de la provincia de Córdoba.
- Chantigny, M.H., D.A. Angers, D. Prévost, L.P. Vecina and F.P. Chalifour.** 1997. Soil aggregation and fungal and bacterial biomass under annual and perennial

- cropping systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61: 262-267.
- Christensen, B.T.** 1996. Carbon in primary and secondary organomineral complexes. *In: M.R. Carter & B.A. Stewart* (Eds.) *Structure and Organic Matter Storage in Agricultural Soils*. pp 97-165. CRC Press, Inc., Boca Raton, FL.
- Cisneros, J.M.** 1994. Caracterización del hidrohalomorfismo en ambientes representativos del centro-sur de Córdoba. Tesis Magister Scientiae en Ciencias del Suelo, Universidad de Buenos Aires.
- Cisneros, J.M., E. Bricchi y C. Cholaky.** 1996a. La erosión en las tierras de maní: un problema complejo. EXPO-MANÍ 96, General Deheza.
- Cisneros, J.M., E. Bricchi, C. Cholaky, F. Formía y M. Uberto.** 1999a. Informe: *Programa de evaluación de suelos en siembra directa*. 28 pp. Estancia Las Lomas, Villa Valeria, Córdoba.
- Cisneros, J.M., E. Bricchi, C. Cholaky, F. Formía y M. Uberto.** 1999b. Informe: *Programa de evaluación de suelos en siembra directa: Situación de Monte natural*. 13 pp. Estancia Las Lomas, Villa Valeria, Córdoba.
- Cisneros, J.M., A. Cantero y E. Bricchi.** 1996b. Ordenación y Manejo de Cuencas. Una experiencia argentina. En: Alvarez V., V.H., L.E.F. Fontes y M.P.F. Fontes (Eds.). *O solo nos grandes dominios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado*, Vicosa, MG, Brasil SBCS, UFV.
- Cisneros, J.M., J.J. Cantero y A. Cantero.** 1999c. Vegetation, soil hydrophysical properties and grazing relationships in saline-sodic soils of Central Argentine. *Can. J. Soil Sci.*, 79: 399-409.
- Cisneros, J.M., C. Cholaky, E. Bricchi, J.J. Cantero y O. Giayetto.** 1996c. Evaluación del efecto del uso sobre las propiedades físicas de un Haplustol típico del centro de Córdoba. Presentado al XV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, La Pampa.
- Cisneros, J.M., C. Cholaky, J. González, M. Uberto y J.J. Cantero.** 2000. Interacciones suelo-pastoreo en las Sierras de Comechingones (Córdoba). XIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata. Suplemento CD-Rom. 4 pp.
- Cisneros, J.M., J.D. De Prada, A. Degioanni, A. Cantero Gutierrez, H.A. Gil, M.A. Reynero, F. Shah y B. Bravo Ureta.** 2004. Erosión hídrica y cambio de

- uso de los suelos en Córdoba. Evaluación mediante el Modelo RUSLE 2. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Paraná. 11 pp.
- Cisneros, J.M., A. Cantero Gutierrez, A. Degioanni, A. Angeli, J.G. González, J.D. De Prada, M.A. Reynero, H.A. Gil, V.H. Becerra y G. Espósito.** 2008. Uso del suelo, erosión y deterioro de caminos rurales: el caso de la cuenca Suco-Moldes-Mackenna (Córdoba). XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. San Luis. 6 pp.
- Cole, V., C. Cerri, K. Minami, A. Mosier, N. Rosenberg, D. Sauerbeck, J. Dumanski, J. Duxbury, J. Freney, R. Gupta, O. Heinemeyer, T. Kolchugina, J. Lee, K. Paustian, D. Powlson, N. Sampson, H. Tiessen, M. van Noordwijk and Q. Zhao.** 1996. Agricultural options for mitigation of greenhouse gas emissions. p. 745-771. *In: Watson, R.T. et al. (ed.). Climate Change 1995. Impacts, adaptations and mitigation of climate change: Scientific-technical analyses.* IPCC Working Group II. Cambridge Univ. Press. Cambridge, UK.
- Cole, C.V., J. Duxbury, J. Freney, O. Heinemeyer, K. Minami, A. Moiser, K. Paustian, N. Rosenberg, N. Sampson, D. Sauerbeck and Q. Zhao.** 1997. Global estimates of potencial mitigation of green house gas emissions by agriculture. *Nutr. Cycling Agroecosyst.*, 49: 221-228.
- Conway, G.R.** 1987. The properties of Agroecosystems. *Agricultural Systems*, 24: 95-117.
- Conway, G.R. and E.B. Barbier.** 1990. After the Green Revolution. Sustainable Agriculture for Development. *Earthcan Publications Ltd.*, London, 205 pp.
- Cooper, A.J.** 1973. Root Temperature and Plant Growth. A Review. *Commonwealth Agricultural Bureaux*, 73 pp.
- Daly, H.E.** 1990. Toward some operational principles of sustainable development. *Ecological Economocs*, 2, 1-6.
- D' Andrea, U. y B. Nores.** 1977. Prospección arqueológica de la zona de Alpa Corral. Ed. de la Universidad Nacional de Río Cuarto. 100 pp.
- D' Andrea, U. y B. Nores.** 1996a. Alpa Corral, sus orígenes y su historia. Ed. Copiar. Córdoba. 96 pp.
- D' Andrea, U. y B. Nores.** 1996b. Los aborígenes de la región del Río Cuarto. Ed. Nuevo Siglo. Córdoba. 90 pp.

- De Prada, J.D.** 1994. Proyecto de conservación y ordenamiento de tierras – General Deheza, Córdoba. Tesis de Magister Scientiae en Formulación, Evaluación y Administración de Proyectos de Inversión. Universidad Nacional de Córdoba. 150 pp.
- De Wit, C.T.** 1992. Resource use efficiency in agricultura. *Agricultural Systems*, 40: 125-151.
- Diovisalvi, N., G. Studdert, G. Domínguez y M. Eiza.** 2006. Materia orgánica total y particulada en un molisol de Balcarce bajo dos sistemas de labranza. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y 1º Reunión de Suelos de la Región Andina, Salta, Argentina.
- Doran, J.W., M. Sarrantonio and M.A. Liebig.** 1996. Soil health and sustainability. *In Advances in Agronomy*, Vol. 56 D.L. Sparks (Ed.). Academic Press, San Diego, CA, pp. 1-54.
- Drury, C.F., C.S. Tan, T.W. Welacky, T.O. Oloya, A.S. Hamil and S.E. Weaver.** 1999. Red clover and tillage influence soil temperature, moisture and corn emergence. *Agron. J.*, 91: 101-108.
- Eswaran, H.** 1994. Soil resilience and sustainable land management in the context of AGENDA 21. p. 21-32. *In: Soil Resilience and Sustainable Land Use*. D.J. Greenland and Szabolcs (Eds.). CAB Int., Wallingford, Oxon.UK.
- Feller, C. and M.H. Beare.** 1997. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma*, 79: 69-116.
- Freibauer, A., M.D.A. Rounsevell, P. Smith and J. Verhagen.** 2004. Carbon sequestration in the agricultural soils of Europe. *Geoderma*, 122: 1-23.
- Galantini, J.A., M. Landriscini y C. Hevia.** 2007. Contenido y calidad de la materia orgánica particulada del suelo. *Sistemas Productivos del Sur y Sudoeste Bonaerense. Revista técnica especial en SD*. Aapresid, 36-40.
- Galantini, J.A.** 2008. Estudio de las fracciones orgánicas en suelos de la Argentina. J.A. Galantini Ed. Bahía Blanca. Univ. Nacional del Sur – Ediuns. 309 pp.
- Gil, H., A. Cantero, V. Becerra, E. Bricchi, I. Ponce, e I. Moreno.** 1983a. Influencia de la enmienda orgánica sobre las propiedades de Hapludoles y Argiudoles de Río Cuarto. I Jornadas Científico-Técnicas FAV. Actas. p. 51.
- Gil, H., A. Cantero, V. Becerra y E. Bricchi.** 1983b. Plan básico de conservación de suelos consorcio “Alto Lindo”. I Jornadas Científico-Técnicas FAV. Actas. p.

- González, J.G.** 1999. Sistemas de información geográfica (SIG) y modelos hidrológicos: Articulación para el estudio de una cuenca representativa en Córdoba (Argentina). Tesis Magister Scientiae en Planificación y Manejo de Cuencas Hidrográficas. 188 pp.
- González, O., A. Cantero, M. Cantú, E. Bricchi y V. Becerra.** 1983. Plan básico de conservación de suelos "La Aguada Sur". I Jornadas Científico-Técnicas FAV. Actas. p. 52.
- González, J., M. Piazza y M. Cantú.** 1996. Caracterización de las tierras en la cuenca arroyo Achiras, como base para el ordenamiento territorial. Dpto. Río Cuarto. Córdoba. IV Congreso Internacional de Ciencias de la tierra. Chile. p. 96.
- Gordillo, C. y A. Lencinas.** 1970. Geología de Córdoba. Resumen del trabajo Sierras Pampeanas de Córdoba y San Luis. Primer Simposio de Geol. Reg. Arg. Cba., 1969. Asoc. Geol. Cba. T.I. N° 1: 3-14, Córdoba.
- Graham-Tomasi, T.** 1991. Sustainability: concepts and implications for agricultural research policy. *In: Agricultural Research Policy: International Quantitative Perspectives* (Ed. by Ph. Pardey, G., J. Roseboom and J.R. Anderson). *Cambridge University Press, Cambridge*, 285 pp.
- Grupo Interamericano para el Desarrollo Sustentable de la Agricultura y los Recursos Naturales.** 1993. Reflexiones sobre el Desarrollo Sostenible de la Agricultura y los Recursos Naturales en las Américas: apuntes de un primer encuentro. Documento de circulación restringida.
- Guggenberg, G, S.D. Frey, J. Six, K. Paustian and E.T. Elliott.** 1999. Bacterial and fungal cell-wall residues in conventional and no-tillage agroecosystems. *Soil Science Society of America Journal*, 63: 1188-1198.
- Gupta, S.C. and W.E. Larson.** 1979. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent, and bulk density. *Water Resour. Res.*, 15: 1633-1635.
- Hampp, E., A. Cantero y E. Bricchi.** 1983. Relaciones entre algunas propiedades de los suelos y condiciones climáticas de la región de Río Cuarto. I Jornadas Científico-Técnicas FAV. Actas. p. 15.
- Hansen, J., Mki. Sato, R. Ruedy, P. Kharecha, A. Lacis, R.L. Miller, L. Nazarenko, K. Lo, G.A. Schmidt, G. Russell, I. Aleinov, S. Bauer, E. Baum, B. Cairns,**

- V. Canuto, M. Chandler, Y. Cheng, A. Cohen, A. Del Genio, G. Faluvegi, E. Fleming, A. Friend, T. Hall, C. Jackman, J. Jonas, M. Kelley, N.Y. Kiang, D. Koch, G. Labow, J. Lerner, S. Menon, T. Novakov, V. Oinas, Ja. Perlwitz, Ju. Perlwitz, D. Rind, A. Romanou, R. Schmunk, D. Shindell, P. Stone, S. Sun, D. Streets, N. Tausnev, D. Thresher, N. Unger, M. Yao, and S. Zhang. 2007. Dangerous human-made interference with climate: A GISS modelE study. *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 2287-2312.
- Hassink, J. 1997. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. *Plant Soil*, 191: 77-87.
- Herrera, M.A., M.A. Beltrán de Solís, F.M. Galera, R. Luti y M. Menghi. 1978. Incendio y pastoreo en estepas de altura de las Sierras Chicas de Córdoba. *Ecología*, 3: 95-99.
- Holguín de Roza, M.L. 1986. Laboulaye. 100 años de vida. Editado por la comisión del Centenario. Municipalidad de Laboulaye.
- Holland, E.A., W.J. Parton, J.K. Detling and D.L. Coppock. 1992. Physiological responses of plant populations to herbivory and their consequences for ecosystem nutrient flows. *Am. Nat.*, 140(4): 685-706.
- Hunsaker, C.T. and D.E. Carpenter. 1990. Environmental Monitoring and Assessment Program Ecological Indicators. *Office of Research and Development*, Washington, D.C., 122 pp.
- Hulme, M. y N. Sheard. 1999. Escenarios de Cambio Climático para Argentina. Unidad de Investigación Climática. Norwich, Reino Unido. 6 pp.
- INDEC - Instituto Nacional de Estadística y Censos, Argentina. 2003. Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. Disponible en www.indec.mecon.ar/ (verificado el 1 de septiembre de 2005).
- INTA - Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. 1985. Carta de suelos de la República Argentina. Hoja 3363-27 La Carlota. 97 pp. Escala 1:50.000.
- INTA - Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. 1986a. Carta de suelos de la República Argentina. Hoja 3363-14 General Cabrera. Escala 1:50.000.
- INTA - Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. 1986b. Carta de suelos de la República Argentina. Hoja 3363-28 Canals. 97 pp. Escala 1:50.000.
- INTA - Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. 1986c. Carta de suelos de la República Argentina. Hoja 3363-33 General Viamonte. 97 pp. Escala 1:50.000.

- INTA - Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.** 1986d. Carta de suelos de la República Argentina. Hoja 3363-34 La Cesira. 97 pp. Escala 1:50.000.
- INTA - Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.** 1986e. Carta de suelos de la República Argentina. Hoja 3566 Hoja Catastral N° 6 Buena Esperanza. Escala 1:50.000.
- INTA - Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.** 1988. Carta de suelos de la República Argentina. Hoja 3363-8 Hernando. 97 pp. Escala 1:50.000.
- INTA - Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.** 1990. Atlas de suelos de la provincia de Córdoba. Escala 1:500.000.
- INTA - Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.** 1991. Carta de suelos de la República Argentina. Hoja 3566 Hoja Catastral N° 8 Arizona. 97 pp. Escala 1:50.000.
- INTA - Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.** 1993a. Carta de suelos de la República Argentina. Hoja 3563-10 Cañada Seca. 73 pp. Escala 1:50.000.
- INTA - Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.** 1993b. Carta de suelos de la República Argentina. Hoja 3563-11 Diego de Alvear. 73 pp. Escala 1:50.000.
- INTA - Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.** 1993c. Carta de suelos de la República Argentina. Hoja 3363-20 Ucaha. 97 pp. Escala 1:50.000.
- INTA - Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.** 1993d. Carta de suelos de la República Argentina. Hoja 3363-21 Pascanas. 97 pp. Escala 1:50.000.
- INTA - Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.** 1994. Carta de suelos de la República Argentina. Hojas 3366-12 Río de los Sauces y 3366-18 Alpa Corral. 97 pp. Escala 1:100.000.
- INTA - Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.** 1998a. Carta de suelos de la República Argentina. Hoja 3363-26 Alejandro. 97 pp. Escala 1:50.000.
- INTA - Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.** 1998b. Carta de suelos y vegetación de la provincia de San Luis. Escala 1:500.000.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).** 1996a. Climate Change 1995: The Science of Climate Change. Houghton, J.T., L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, y K. Maskell (Eds.). Contribution of Working Group 1 to the second assessment report of the IPCC, Cambridge University Press. Cambridge, UK.

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).** 1996b. Climate Change 1995: Impacts, adaptations, and mitigation of climate change: Scientific-technical analyses. Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge Univ. Press. Cambridge, UK.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).** 1997. Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Reference manual (Volume 3). IPCC, Meteorological Office, Bracknell, UK.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).** 2000. Land use, land use change, and forestry: A special report. Cambridge Univ. Press. Cambridge, UK.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).** 2001. Climate Change 2001: A scientific basis. Cambridge Univ. Press. Cambridge, UK.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).** 2003. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. IPCC/IGES, Hayama, Japan.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).** 2007. Latin America. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the 4th Assessment Report of the IPCC. Cambridge Univ. Press. Cambridge, UK.
- Irizar, A., A. Andriulo, C. Sasal, S. Restovich, L. Darder, F. Rimatori y L. Hanuch.** 2006. Efecto de diferentes sistemas de labranzas y de la fertilización nitrogenada sobre el carbono orgánico particulado en la rotación maíz trigo-soja. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y 1º Reunión de Suelos de la Región Andina, Salta, Argentina.
- Jarsún, B.** 1979. Informe Grupo Crea "Villa Valeria". Plan mapa de suelos de la Provincia de Córdoba. Convenio INTA – SEAG. 151 pp.
- Jenkinson, D.S. and J.H. Rayner.** 1977. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. *Soil Sci.*, 123: 298-305.
- Jenkinson, D.S.** 1990. The turnover of organic carbon and nitrogen. *Philos. Trans. R. Soc. London B*, 329: 361-368.
- Keeney, D.** 1986. Sources of nitrogen to ground water. *CRC Crit. Rev. Environ. Control*, 16, 257-304.
- Koslovski, F.** 1972. Structural-functional and mathematical model of migrational landscape geochemical process. *Soviet Soil Sci.*, 4(2): 228-243.

- Koutika, S., N. Dassonville, S. van der Hoeven, L. Chapuis-Lardy and P. Meerts.** 2008. Relationships between C respiration and fine particulate organic matter (250-50 μ) weight. *Eur. J. Soil Biol.* Disponible on line, digital object identifier (doi): 10.1016/j. ejso.2007.10.006.
- Kraus, T.A., C.A. Bianco y C.O. Núñez.** 1999. Los ambientes naturales del sur de la Provincia de Córdoba. Pasado, Presente y Futuro, con énfasis en Vegetación y Suelos. Editorial de la Fundación Universidad Nacional de Río Cuarto. 112 pp.
- Labraga, J.C.** 1998. Escenario de Cambio Climático para la Argentina. *Revista Ciencia Hoy*, 8(44): 1-11.
- Ladd, J.N., M. Amato and J.M. Oades.** 1985. Decomposition of plant material in Australian soils III. Residual organic and microbial biomass C and N from isotope-labelled legume material and soil organic matter, decomposing under field conditions. *Aust. J. Soil Res.*, 23: 603-611.
- Lal, R.** 2004. Agricultural activities and the global carbon cycle. *Nutr. Cycling Agroecosyst.*, 70: 103-116.
- Larson, W.E. and F.J. Pierce.** 1994. Conservation and enhancement of soil quality. In Evaluation for sustainable land management in the developing world. Vol. 2: Technical papers. International Board for Research and Management, Bangkok, Thailand. IBSRAM Proceedings No. 12(2), pp. 175-203.
- León, R.J.C. y D.L. Anderson.** 1983. El límite occidental del pastizal pampeano. *Tuexenia*, 3: 67-83.
- León, R.J.C., G.M. Rusch y M. Oesterheld.** 1984. Pastizales pampeanos - impacto agropecuario. *Phytocoenología*, 12: 201-218.
- Linacre, E.T.** 1977. A simple formula for estimating evaporation rates in various climates, using temperature data alone. *Agric. Meteorol.*, 18: 409-424.
- Lokupitiya, E. and K. Paustian.** 2006. Agricultural Soil Greenhouse Gas Emissions: A review of National Inventory Methods. *J. Environ. Qual.*, 35: 1413-1427.
- Lutti, R., M. Beltrán de Solís, F.M. Galera, N. Müller de Ferreira, M. Berzal, M. Nores, M.A. Herrera y J.C. Barrera.** 1979. Vegetación. En: Geografía Física de la provincial de Córdoba. Ed. Vasquez, J.B., R.A. Miatello y M.E. Roque. Córdoba.
- Magrin, G., C. Gay García, D. Cruz Choque, J.C. Giménez, A.R. Moreno, G.J. Nagy, C. Nobre and A. Villamizar.** 2007. Latin America. Climate Change

- 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Parry, M.L., O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson Eds. Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- Mansilla, L.V.** 1944. Una excursión a los indios Ranqueles. Ed. Austral, 4º edición. Buenos Aires. 299 pp.
- Mc Gill, W.B. and C.V. Cole.** 1981. Comparative aspects of cycling of organic C, N, S and P through soil organic matter. *Geoderma*, 28: 267-286.
- Menghi, M., Beltrán de Solís, M., Galera, M., Herrera, M.A. y R. Tutti.** 1978. Productividad primaria de los pastizales de altura de las Sierras Chicas de Córdoba. *Ecología*, 3: 101-110.
- Merckx, R., A. Den Hartog and J.A. van Veen.** 1985. Turnover of root-derived material and related microbial biomass formation in soils of different texture. *Soil Biology and Biochemistry*, 17: 565-569.
- Metherell, A.K.** 1992. Simulation of soil organic matter dynamics and nutrient cycling in agro-ecosystems. Ph.D. diss., Colorado State Univ., Fort Collins (Diss. Abstr. 93-11391).
- Michelena, R.O., C.B. Ururtia, A. Pittaluga y F. Vavruska.** 1988. Degradación de los suelos en el sector norte de la Pampa Ondulada. *Ciencia del Suelo*. 6: 60-66.
- Monteith, J.L.** 1981. Climatic variation and the growth of crops. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 107: 749-774.
- Odum, E.P.** 1989. Input management of production systems. *Science* (Washington, D.C.), 243, 177-182.
- Ogle, S.M. and K. Paustian.** 2005. Soil organic carbon as an indicator of environmental quality at the national scale: Inventory monitoring methods and policy relevance. *Can. J. Soil Sci.*, 85: 531-540.
- Ogle, S.M., F.J. Breidt and K. Paustian.** 2005. Agricultural management impacts on soil organic carbon storage under moist and dry climatic conditions of temperate and tropical regions. *Biogeochemistry*, 72: 87-121.
- Ojima, D.S., W.J. Parton, D.S. Schimel and C.E. Owensby.** 1990. Simulated impacts of annual burning on prairie ecosystems. In: Proceedings symposium on statistical hydrology. United States Department of Agriculture Misc. Pub. N. 1275. 154-171.

- Orquín, L.E., E.G. Gabutti y E.N. Ocaneo.** 1985. Ecología y pastizales naturales – Guía de trabajos prácticos, Universidad Nacional de San Luis, 85 pp.
- Palma, R.M., N.M. Arrigo y M.E. Conti.** 1997. Siembra directa y labranza convencional: cambios que produce a largo plazo la fertilización sobre las fracciones de carbono y nitrógeno del suelo. *Rev. Facultad de Agronomía*, 17(3): 313-317.
- Parodi, L.R.** 1964. Regiones fitogeográficas argentinas. Enciclopedia de Agricultura y Jardinería. T. II. Ed. Acme. Buenos Aires.
- Parodi, L.R.** 1966. La agricultura aborigen argentina. Ed. EUDEBA. Buenos Aires. Argentina.
- Parton, W.J.** 1984. Predicting soil temperature in a shortgrass steppe. *Soil Sci.*, 138: 93-101.
- Parton, W.J.** 1996. The CENTURY model. In: Evaluation of soil organic matter models using existing long-term datasets. (Powlson, D.S., P. Smith and J.U. Smith eds.). NATO ASI Series I, Springer-Verlag, Berlín, Germany. pp. 283-293.
- Parton, W.J., R. Mc Keown, V. Kirchner and D. Ojima.** 1992. Users guide for the CENTURY model. Colorado State University.
- Parton, W.J., D.S. Ojima, C.V. Cole and D.S. Schimel.** 1994. A General Model for Soil Organic Matter Dynamics: Sensitivity to Litter Chemistry, Texture and Management. p. 147-167. In: Soil Science Society of America, 677 S. Segoe Rd., Madison, WI 53711, USA. *Quantitative Modeling of Soil Forming Processes*, SSSA Special Publication 39.
- Parton, W.J. and P.E. Rasmussen.** 1994. Long term effects of residue management in wheat-fallow: II CENTURY model simulations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 530-536.
- Parton, W.J., D.S. Schimel, C.V. Cole, and D.S. Ojima,** 1987. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 51: 1173-1179.
- Parton, W.J., J.W.B. Stewart, and C.V. Cole.** 1988. Dynamics of C, N, P and S in grassland soils: a model. *Biochemistry* 5: 109-131.

- Paul, E.A., H.P. Collins and S.W. Leavitt.** 2001. Dynamisc of resistant soil carbon of Midwestern agricultural soils measured by naturally occurring ^{14}C abundance. *Geoderma*, 104: 239-256.
- Paustian, K., O. Andre' n, H.H. Janzen, R. Lal, P. Smith, G. Tian, H. Tiessen, M. van Noordwijk and P.L. Woomer.** 1997. Agricultural soils as sink to mitigate CO_2 emissions. *Soil Use Manage*, 13: 230-244.
- Paustian, K., H.P. Collins and E.A. Paul.** 1997. Management controls on soil carbon. p. 15-49. *In: Paul, E.A. et al. (ed.). Soil organic matter in temperate agroecosystems.* CRC Press. New York, USA.
- Paustian, K, W.J. Parton and J. Person.** 1992. Modelling soil organic matter in organic-amended and nitrogen-fertilized long term plots. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56: 476-488.
- Paustian, K., J. Six, E. Elliott and H.W. Hunt.** 2000. Management options for reducing CO_2 emissions from agricultural soils. *Biogeochemistry*, 48: 147-163.
- Peña Zubiarte, C.A., D. Maldonado Pinedo, H. Martínez y R. Hevia.** 1980. Suelos. En: *Inventario Integrado de las Recursos Naturales de la Provincia de La Pampa.* INTA – Gobierno de la Provincia de La Pampa. Universidad Nacional de La Pampa (Eds.), Argentina.
- Probert, M.E., B.A. Keating, J.P. Thompson and W.J. Parton.** 1995. Modelling water, nitrogen, and crop yield for a long-term fallow management experiment. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 35: 941-950.
- Puget, P., D.A. Angers and C. Chenu.** 1999. Nature of carbohydrates associated with water-stable aggregates of two cultivated soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 31: 55-63.
- Puget, P. and R. Lal.** 2004. Soil organic carbon and nitrogen in a Mollisol in central Ohio as affected by tillage and land use. *Soil and Tillage Research*, 80: 201-213.
- Ragonese, A.E.** 1967. *Vegetación y ganadería de la república Argentina.* Colección Científica INTA, 5. Buenos Aires.
- Rasmussen, P.E. and W.J. Parton.** 1993. Long term effects of residue management in wheat-fallow: I Inputs, yield, and soil organic matter. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58: 523-530.

- Ravello, A. y R. Seiler.** 1978/79. Agroclima de la Provincia de Córdoba: Expectativa de Precipitación en el Curso del Año. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, (RIA) Vol. XIV, N° 3, 71-136.
- Rawls, W.J., D.L. Brakensiek and K.E. Saxton.** 1982. Estimation of soil water properties. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1316-1328.
- Rovira, A.D.** 1993. Sustainable farming systems in the cereal livestock areas of the Mediterranean region of Australia. Keynote paper at the Int. Conf. on Soil Management in Sustainable Agriculture. Wye College, UK., september 1993.
- Ruttan, V.** 1992. Challenges and opportunities for the national agricultural research system in the year 2000 and beyond. *ISNAR Policy Dialogue*, Berlin, Jan. 13-18.
- Ruttan, V.** 1993. Sustainable growth in agricultural production: poetry, policy and science. *Interpaks Digests*, 1: 3-6.
- Ryan, M.G.** 1991. Effects of climates change on plant respiration. *Ecol. Appl.*, 1: 157-167.
- Sala, O.E., M. Oesteheld, R.J.C. León y A. Soriano.** 1986. Grazing effects upon plan community structure in subhumid grasslands of Argentina. *Vegetatio*, 67: 27-32.
- Sala, O.E., W.J. Parton, L.A. Joyce and W.K. Lauenroth.** 1988. Primary production of the central grassland region of the United State. *Ecology*, 69: 40-45.
- Sanford, R.L. Jr., W.J. Parton, D.S. Ojima and D.J. Lodge.** 1991. Hurricane effects on soil organic matter dynamics and forest production in the Luquillo Experimental Forest, Puerto Rico: Results of simulation modelling. *Biotropica*, 23(4a): 364-372.
- Schaeffer, D.J., E.E. Herricks and H.W. Kerster.** 1988. Ecosystem health. I. Measuring ecosystem health. *Environmental Management*, 12, 445-455.
- Schlesinger, W.H.** 1997. Biogeochemistry: An analysis of global change. Academic Press. San Diego, CA, USA.
- Seybold, C.A., J.E. Herrick, and J.J. Brejda.** 1999. Soil resilience: a fundamental component of soil quality. *Soil Science*, 1644: 224-234.
- Six, J., C. Feller, K. Deneff, S.M. Ogle, J.C. Moraes Sa and A. Albrech.** 2002. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils: Effects of no-tillage. *Agronomie*, 22: 755-775.

- Smith, P.** 2004. Carbon sequestration in croplands: The potential in Europe and the global context. *Eur. J. Agron.*, 20: 229-236.
- Smyth, A.J. and J. Dumanski.** 1995. A framework for evaluating sustainable land management. *Can. J. Soil. Sci.*, 75: 401-406.
- Steinbach, H.S. and R. Álvarez.** 2006. Changes in Soil Organic Carbon Contents and Nitrous Oxide Emissions after Introduction of No-Till in Pampean Agroecosystems. *J. Environ. Qual.*, 35: 3-13.
- Sorensen, L.H.** 1972. Stabilization of newly formed amino acid metabolites in soil by clay minerals. *Soil Sci.*, 114: 5-11.
- Soriano, A.** 1991. Río de la Plata grasslands. *En: Ecosystems of the world 8 A*, Ed. R.T.Copland. *Elsevier*, Amsterdam. pp. 367-407.
- Statistix for Windows.** 1996. User's Manual. Analytical Software, Tallahassee, FL, EEUU.
- Stevenson, F..J.** 1986. Cycles of soil carbon, nitrogen, phosphorus, sulphur, micronutrients. John Wiley & Sons Inc. New York.
- Stevenson, F.J.** 1994. Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions. John Wiley & Sons, New York. 496 pp.
- Suter, G.W.** 1990. Endpoints for regional ecological risk assessment. *Environmental Management*, 14, 9-23.
- Thornley, J.H.M., D. Fowler, and M.G.R. Cannell.** 1991. Terrestrial carbon storage resulting from CO₂ and nitrogen fertilization in temperate grasslands. *Plant Cell and Environ.*, 14: 1007-1011.
- Thorntwaite, C.S. y J.R. Mather.** 1967. Instrucciones para el cómputo de la evapotranspiración potencial y el balance hídrico. (Traducción castellana de A.J. Rodríguez Sáenz y G.A. Juárez. Tirada interna N° 46, INTA – ISA, Buenos Aires).
- Tisdell, C.A.** 1993. Economics of Environmental Conservation. *Economics for environmental and ecological management*. Elsevier, Amsterdam, 233 pp.
- Tisdale, J.M. and J.M. Oades.** 1982. Organic matter and water stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.* 33: 141-163.
- Tittonell, P.A.** 2004. El carbono orgánico en los suelos de la región central de Argentina. Derivando indicadores de sustentabilidad a partir de su evolución y estado de equilibrio actual. Tesis de Maestría en Ciencias Agropecuarias con

- Mención en Manejo de Tierras. Facultad de Agronomía y Veterinaria. Universidad Nacional de Río Cuarto. Córdoba, Argentina. 239 pp.
- Uberto, M., J.M. Cisneros, C. Viglioco, C. Cholaky y R. Pedelini.** 2001. Recuperación de la productividad en tierras del area manicera núcleo. I. Propiedades físicas. Actas de las XVI Jornadas Nacionales de Maní. Gral. Cabrera, Córdoba. p. 16-18.
- USDA – United State Department of Agronomy.** 1991. The 1991 Yearbook of Agriculture. Washington, D.C., 175-205.
- USDA – United State Department of Agronomy.** 1999. Soil Taxonomy - A Basic System of Soil Classification. Washington, D.C.
- USEPA.** 2004. Inventory of U.S. greenhouse gas emissions and sinks: 1990-2002. Disponible en www.epa.gov/globalwarming/publications/emissions (verificado el 3 de enero de 2006). USEPA, Washington, DC., USA.
- Valero, C., S. Degiovanni, E. Bricchi y E. Bonadeo.** 1984. Estudio preliminar para el ordenamiento y mejor aprovechamiento del agua en el geosistema Arroyo Jagüeles. V Jornadas Científicas de la Facultad de Ciencias Exactas. U.N.R.C.
- van Heemst, H.D.J.** 186. Physiological principles. In: Modelling of agricultural production: weather, soils and crops. van Keulen, H. and J. Wolf (eds.). Pudoc, Wageningen. 13-26.
- van Veen, J.A. and E.A. Paul.** 1981. Organic C dynamics in grassland soils. I. Background information and computer simulation. *Can. J. Soil Sci.*, 61: 185-201.
- van Wambeke, A. y C.O. Scoppa.** 1976. Los regímenes hídricos de los suelos argentinos, calculados sobre la base de los registros climáticos. *INTA – IDIA Supl.*, 33: 388-401.
- Vazquez, M.E., L.A. Berasategui, E.R. Chamorro, L.A. Taquini y L.A. Barberis.** 1990. Evolución de la calidad estructural y diferentes propiedades químicas según el uso de los suelos en tres áreas de la pradera pampeana. *Ciencia del Suelo*, 8: 203-210.
- Viglizzo, E.F.** 1994. El INTA frente al desafío del desarrollo agropecuario sustentable. *En: Desarrollo Agropecuario Sustentable, INTA-INDEC*, 1-21.
- Viglizzo, E.F.** 1996. La sustentabilidad en agricultura. ¿Cómo evaluar y medir?. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 26, 1-15.

- Voroney, R.P., J.A. van Veen and E.A. Paul.** 1981. Organic C dynamics in grassland soils.
- Wagner, R.E.** 1990. Finding the middle of the road on sustainability. *J. Prod. Agric.*, 3, 277-280.
- Walkley and Black.** 1976. Determinación de Materia Orgánica. En: **Jackson, M.L.** Análisis químico de suelos. Tercera Edición. Ed. Omega S.A. Barcelona, España. 662 pp.
- Warkentin, B.P.** 1995. The changing concept of soil quality. *J. Soil Water Conserv.*, 50: 226-228.
- WCED.** 1987. Our Common Future (The Brundtland Report). World Commission on Environment and Development. *Oxford University Press*, Oxford.
- West, T.O. and W.M. Post.** 2002. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: A global data analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 66: 1930-1946.
- Winograd, M.** 1993. Perspectiva ambiental para América Latina: definición y uso de indicadores. *Seminario sobre Desarrollo Sustentable para América Latina*, La Plata, 8-11.
- Wosten, J.H.M. and M.T. van Genuchten.** 1988. Using texture and other soil properties to predict the unsaturated soil hydraulic functions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52: 1762-1770.
- Zagal, E., N. Rodríguez, I. Vidal y B. Flores.** 2002. La fracción liviana de la materia orgánica de un suelo volcánico bajo distinto manejo agronómico como índice de cambios de la materia orgánica lábil. *Agricultura Técnica*, 62(2): 284 -296.
- Zotarelli, L., B. Alves, S. Urquiaga, R. Boddey, and J. Six.** 2007. Impact of tillage and crop rotation on light fraction and intra-aggregate soil organic matter in two oxisols. *Soil and Tillage Research*, 95: 196-206.

Anexo I. Parámetros y funciones del modelo Century

Cálculo del agua de escurrimiento

Para el cálculo del escurrimiento el Century utiliza los parámetros de sitio de la Tabla I.1 y la siguiente ecuación cuadrática: $Escurrecimiento = A w^2 + B w - C$. La variable w representa el total de agua aportada al sitio, mientras que A , B y C son los coeficientes descritos en la Tabla I.1. Asignando el valor cero al coeficiente de segundo orden la ecuación se transforma en una expresión lineal. Si su resultado es negativo, el escurrimiento adquiere valor cero, lo cual provee un valor umbral para el aporte hídrico (ordenada al origen) por debajo del cual no existe escurrimiento.

Tabla I.1: Parámetros de sitio utilizados por defecto en el Century para el cálculo del escurrimiento.

Parámetro de Sitio	Descripción	Valor por defecto
RUNOFF1	Coefficiente de segundo orden A (término no lineal)	0
RUNOFF2	Coefficiente de primer orden B (pendiente – lineal)	0,55
RUNOFF3	Constante C (ordenada al origen)	2,75

RUNOFF(*): Nombre dado en el modelo al parámetro de escurrimiento.

Si todos los parámetros de sitio (coeficientes) adquieren valor cero durante el diseño de la simulación, el modelo utiliza valores por defecto tomados de Probert *et al.* (1995) para parcelas sin cobertura de residuos vegetales. Para parcelas con cobertura de residuos el coeficiente B adquiere un valor de 0,41 y la constante C de 2,87. La versión Century 4.0 utiliza una relación lineal con $B = 0,15$ y $C = 1,2$. Para la cuenca noroeste del río Mississippi, Sharpe *et al.* (1998) y Harden *et al.* (1999) utilizaron una relación no lineal derivada de una curva ajustada con datos empíricos (Tabla I.2).

Tabla I.2: Valores alternativos para los parámetros de la ecuación de escurrimiento.

Fuente	A	B	C	Umbral de aporte hídrico (cm)
Valor defecto sin cobertura (Probert <i>et al.</i> , 1995)	0	0,55	2,75	5,0
Con cobertura (Probert <i>et al.</i> , 1995)*	0	0,41	2,87	7,0
Century 4.0	0	0,150	1,20	8,0
Mississippi (Sharpe <i>et al.</i> , 1998)*	0,013	0,251	1,332	4,3

* Citados en el original: Parton *et al.*, 1992.

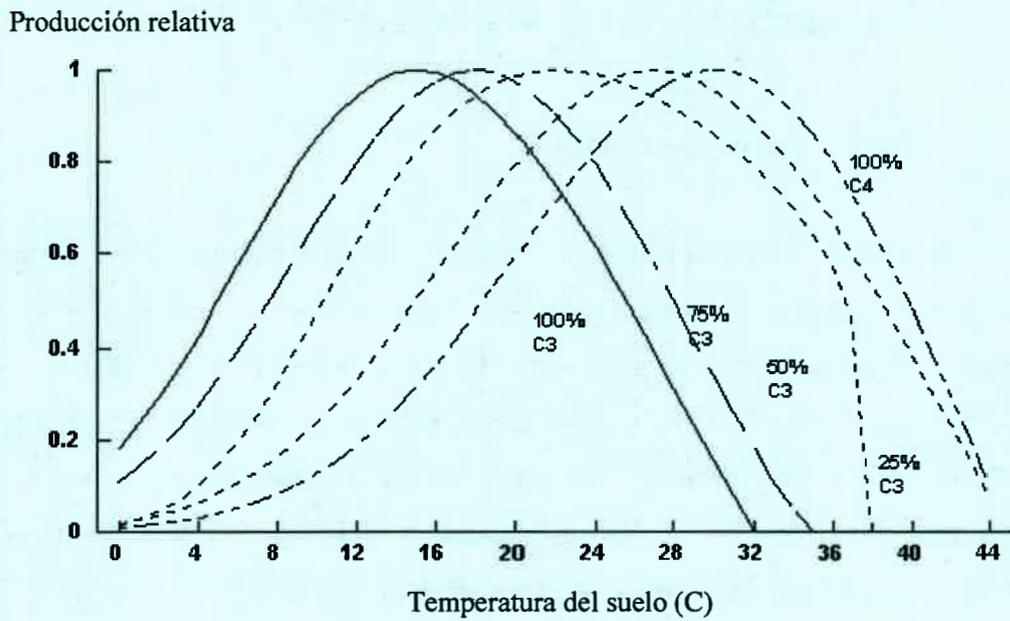


Figura I.1: Función de densidad de Poisson generalizada utilizada para generar un factor multiplicativo de respuesta de la tasa de crecimiento de diferentes cultivos a la temperatura.

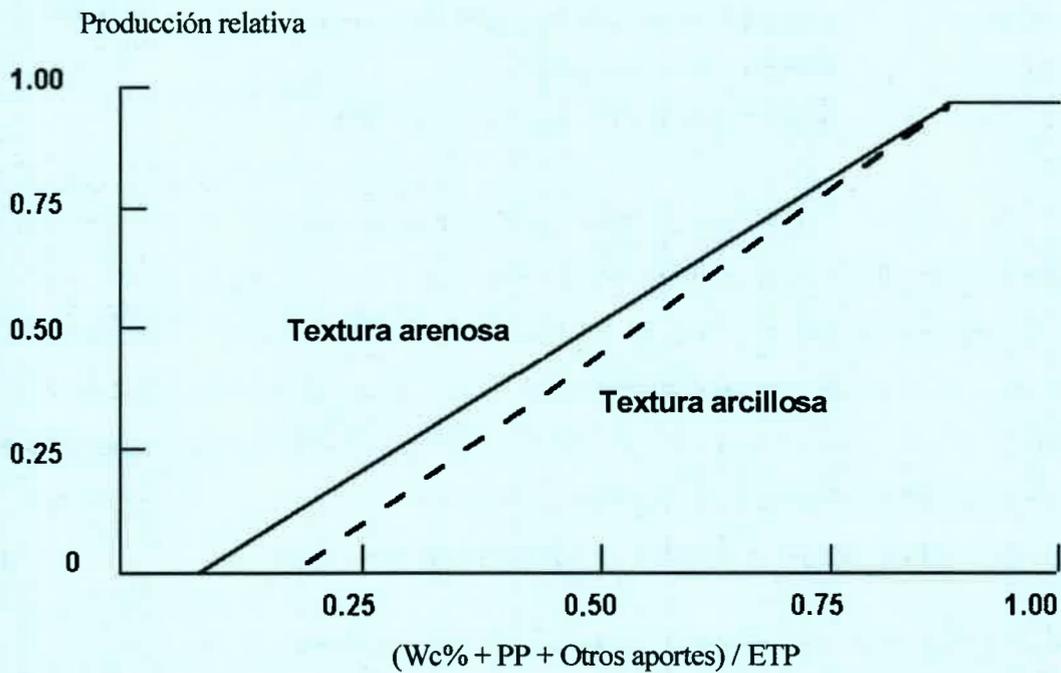


Figura I.2: Efecto de la disponibilidad hídrica sobre la producción potencial de biomasa para suelos de texturas contrastantes. Wc%: Contenido hídrico del suelo, PP: Precipitaciones, ETP: Evapotranspiración potencial.

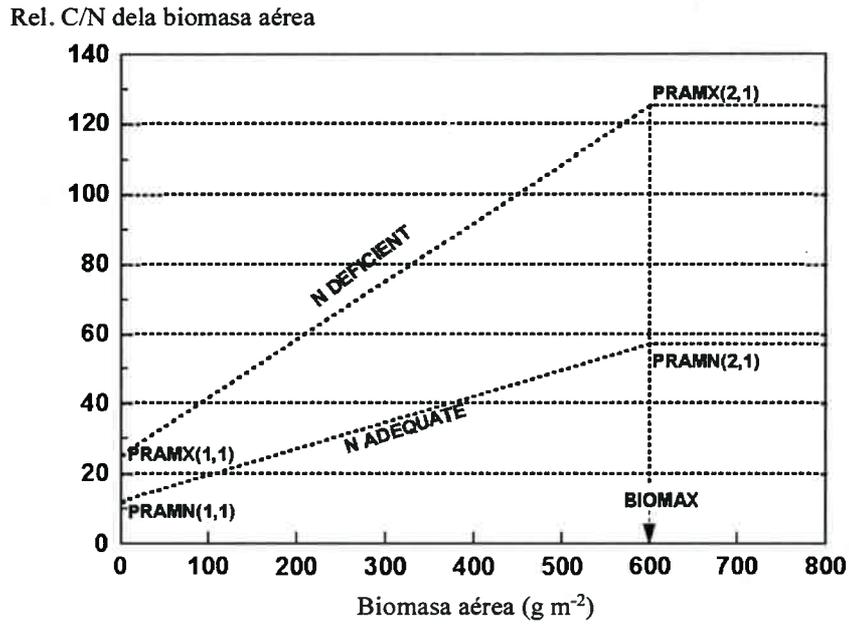


Figura I.3: Relación C/N de la biomasa aérea en función de la cantidad total de biomasa aérea producida para dos situaciones contrastantes (*N deficient* y *N adequate*) de disponibilidad de nitrógeno (tomado de Parton *et al.*, 1994). Las curvas encierran los límites que impone el modelo para la concentración de N en los tejidos aéreos. PRAMX(*) y PRAMN(*): Máxima y Mínima concentración tisular de nutrientes, respectivamente.

Reducción relativa en la disponibilidad de nutrientes

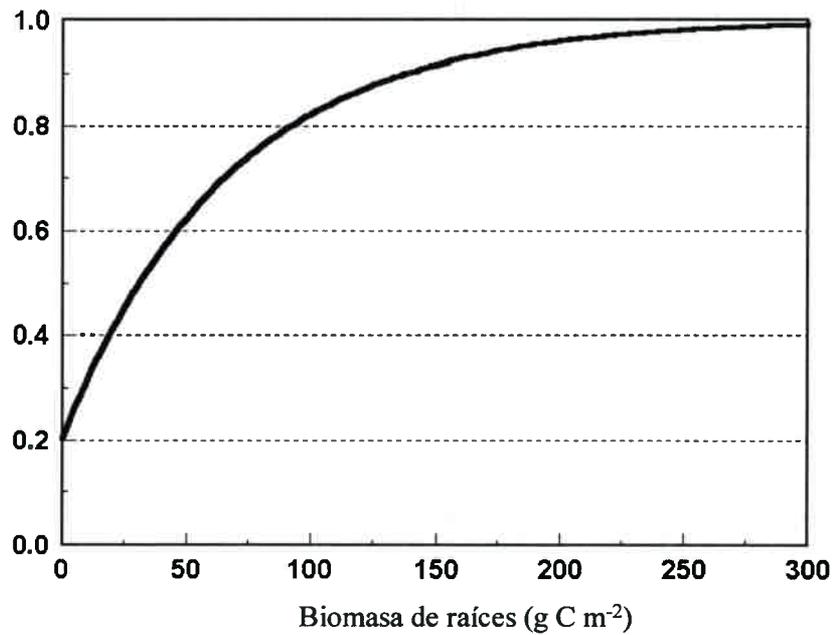


Figura I.4: Factor de reducción para la disponibilidad de nutrientes en función de la biomasa de raíces explorando el perfil (tomado de Parton *et al.*, 1994).

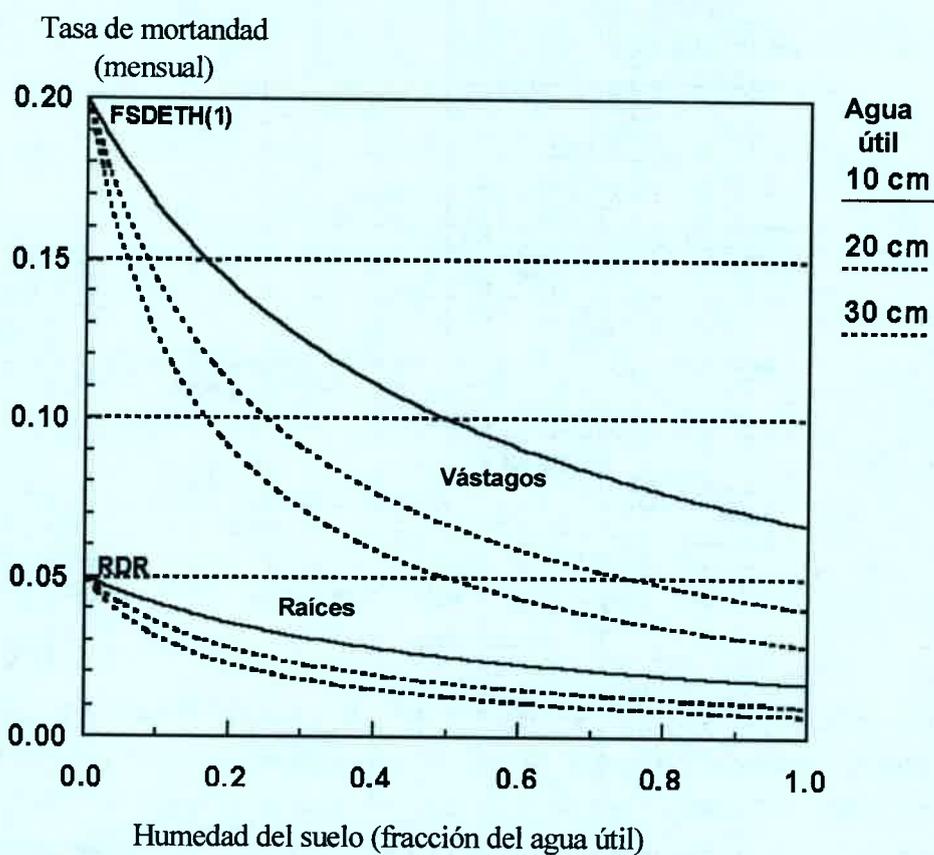


Figura I.5: Efecto de la disponibilidad de agua en todo el perfil y en la zona radicular sobre la tasa de mortandad de vástagos y raíces, respectivamente, para tres suelos con diferente capacidad de retención hídrica (10, 20 y 30 cm de agua útil). FSDETH y RDR: Tasa de mortandad máxima de vástagos y raíces, respectivamente (tomado de Parton *et al.*, 1994).

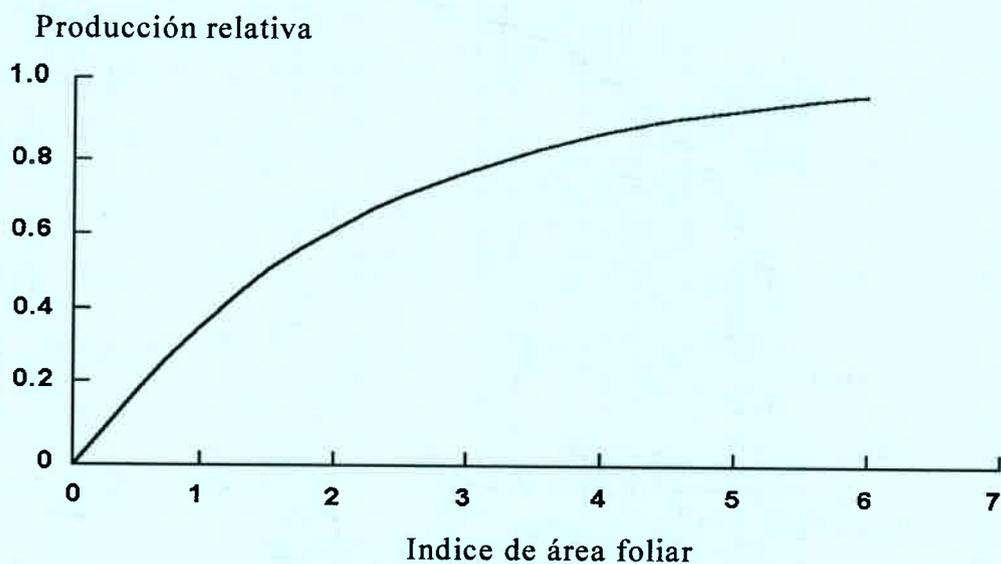


Figura I.6: Factor de reducción para la tasa máxima de producción de biomasa forestal en función del índice de área foliar (hojas activas).

Fracción leñosa activa

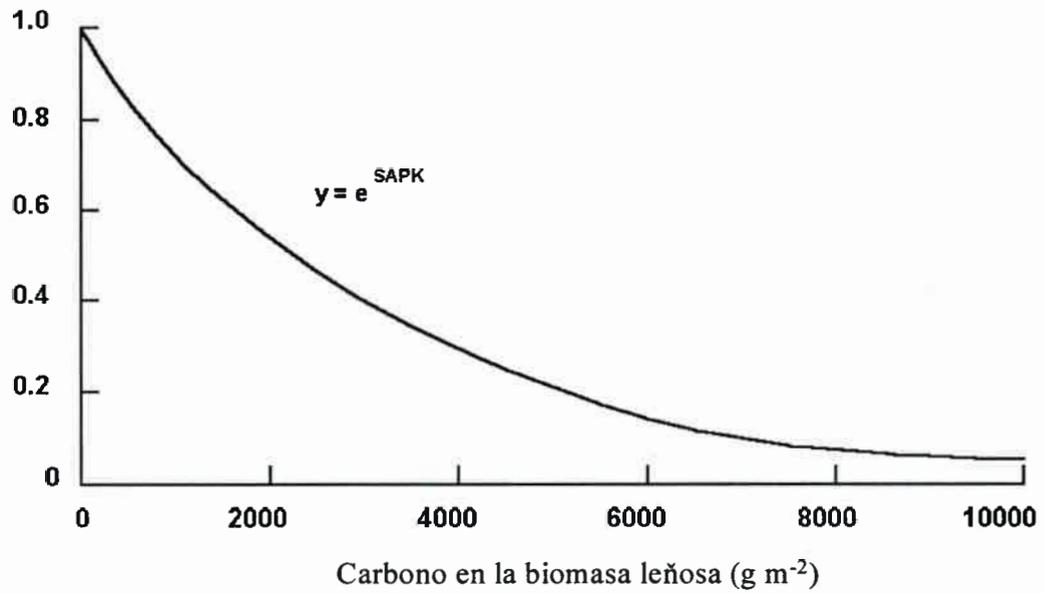


Figura I.7: Fracción leñosa activa en función de la biomasa leñosa total expresada en términos de C. SAPK: Parámetro de partición del C entre las fracciones leñosas activa y no activa.

Relación C en hojas/biomasa leñosa

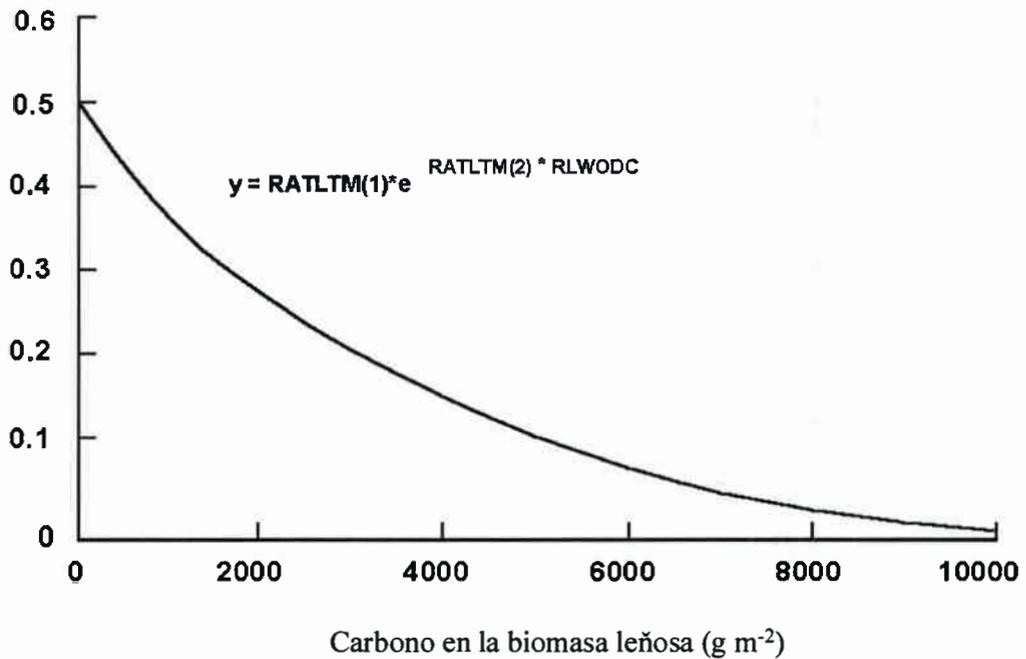


Figura I.8: Proporción de biomasa foliar en función de la biomasa leñosa total expresada en términos de C. RLWODC: C en la biomasa leñosa total; RATLTM: Máxima proporción de C foliar en relación a biomasa leñosa activa.

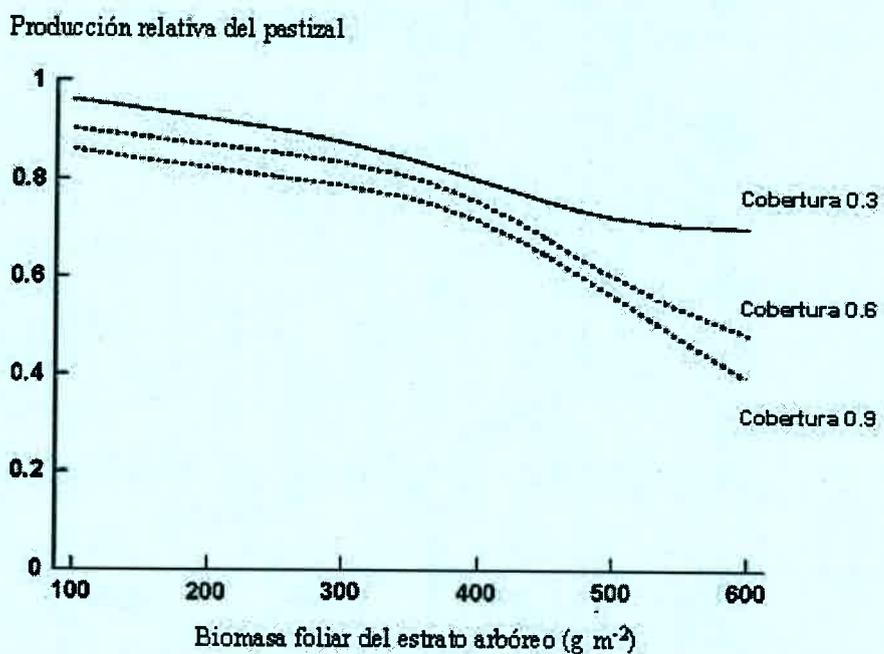


Figura I.9: Factor de reducción de la producción del pastizal en función de la cobertura y biomasa foliar del estrato arbóreo en ecosistemas de tipo sabana utilizado por el Century.

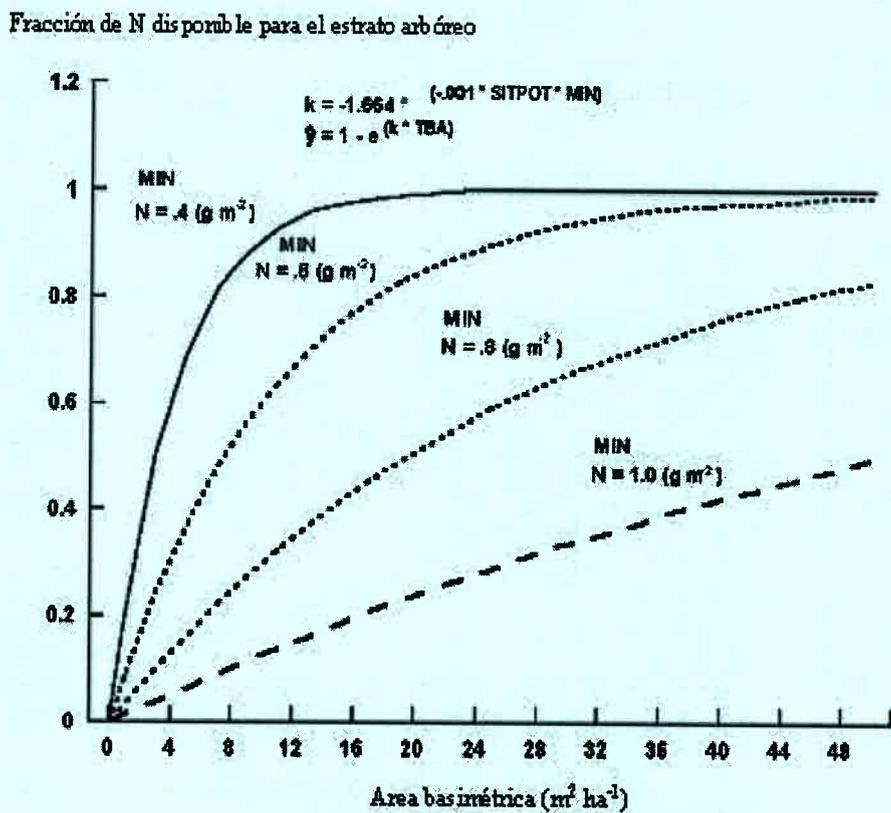


Figura I.10: Fracción del N disponible para la absorción por el estrato arbóreo en función de su área basimétrica, para diferentes situaciones de disponibilidad de N. MIN: N mineral disponible (g m^{-2}); TBA: Área basimétrica ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$); SITPOT: Factor potencial de sitio forestal.

Tabla I.3: Parámetros de vegetación utilizados por el Century, correspondientes a un pastizal templado con predominio de gramíneas C3 (Parton *et al.*, 2001).

Descripción del parámetro	Código	Magnitud	Unidad
Producción potencial mensual de biomasa aérea	PRDX(1)	270	G m ⁻²
Temperatura óptima, parámetro de la distribución Poisson que simula el efecto de la temperatura sobre el crecimiento	PPDF(1)	18	°C
Temperatura máxima, parámetro de la distribución Poisson que simula el efecto de la temperatura sobre el crecimiento	PPDF(2)	35	°C
Nivel de biomasa muerta en pie al cual el crecimiento es reducido por obstrucción física	BIOK5	60	G m ⁻²
Nivel de biomasa aérea que produce 100% de cobertura	FULCAN	100	G m ⁻²
Máximo nivel de biomasa aérea a partir del cual la relación C:X* adquiere un valor constante (parámetros PRAMX)	BIOMAX	400	G m ⁻²
Mínima relación C:N para la biomasa aérea inicial	PRAMN(1,1)	20	
Mínima relación C:N para la biomasa aérea cuando la misma alcanza biomax	PRAMN(1,2)	30	
Máxima relación C:N para la biomasa aérea inicial	PRAMX(1,1)	30	
Máxima relación C:N para la biomasa aérea cuando la misma alcanza biomax	PRAMX(1,2)	50	
Ordenada al origen para el cálculo de la relación C:N de la biomasa subterránea en función lineal de la precipitación anual	PRBMN(1,1)	50	
Pendiente de la función lineal entre la precipitación anual y la relación C:N de la biomasa subterránea	PRBMN(1,2)	0	
Ordenada al origen de la función lineal entre la precipitación anual y el contenido de lignina de la biomasa aérea	FLIGNI(1,1)	0,02	
Pendiente de la función lineal entre la precipitación anual y el contenido de lignina de la biomasa aérea	FLIGNI(2,1)	0,0012	
Máxima tasa de mortandad de vástagos en condiciones de bajo contenido hídrico del suelo	FSDETH(1)	0,20	
Fracción de vástagos que muere mensualmente durante los meses de senescencia del pastizal	FSDETH(2)	0,95	
Nivel de biomasa aérea por encima del cual el sombreado aumenta la tasa de senescencia	FSDETH(4)	150	G m ⁻²
Fracción de vástagos muertos en pie que se incorpora mensualmente al suelo	FALLRT	0,15	
Máxima tasa de mortandad de raíces en condiciones de bajo contenido hídrico del suelo	RDR	0,12	
Umbral de temperatura para la muerte de raíces, afectando a la relación vástago:raíz.	RTDTMP	2	°C

* Relación C:X indica en forma genérica C:N, C:P o C:S.

II.2 Aspectos geológicos, geomorfológicos e hidrológicos

II.2.1 Llanuras bien drenadas

Las *llanuras bien drenadas fuertemente onduladas* ocupan el sector oeste de la sub-región, limitando en forma difusa con el área pedemontana del faldeo oriental de las sierras de Comechingones. En la mayor parte del área afloran sedimentos de origen eólico, cuya granulometría varía entre arenas muy finas y limos finos. En el sector septentrional, hacia el sur del arroyo El Cano, dominan materiales finos, aunque en algunos sectores asociados al abanico de los cauces, los materiales aluviales son más gruesos. Existe un gran desarrollo de laderas o vertientes a los cauces, determinando pendientes complejas de hasta el 15 %, y es posible observar también áreas altas, planas, con escasa disección y cubierta eólica loésica (Cantú, 1998).

En el sector central de esta unidad -cuenca del arroyo Cipión- debido a la mayor granulometría de los materiales (arenosos finos) existe un menor desarrollo de laderas. La distribución de los arroyos presenta un marcado control estructural y el relieve es fuertemente ondulado, compuesto por lomas alargadas en el sentido de la pendiente regional y con laderas del 5 al 10 %. Al sur de la unidad, desde el arroyo Achiras hasta las proximidades de la localidad de Chaján, existe una red de drenaje bien desarrollada con pendiente sur-sudeste, implantada en un área de médanos longitudinales de dirección NNO-SSE producidos por vientos locales bajo el control de las sierras. La granulometría de los materiales varía desde arenosa gruesa, con gravillas dispersas, a arenosa fina al aumentar la distancia a las sierras (Cantú y Degiovanni, 1984).

Hacia el sur y el este de la sub-región llanuras bien drenadas, se desarrollan las *llanuras bien drenadas moderada a suavemente onduladas* (Imagen II.1), donde predominan materiales originarios de suelos loésicos finos sobre los que se han desarrollados suelos profundos. Aisladamente aparece una cubierta eólica más reciente compuesta por materiales franco arenosos finos que constituyen las formas más



Imagen II.1: Llanuras bien drenadas

prominentes del relieve, mientras que en ciertos sectores se observan además rasgos que corresponden a ciclos fluvio-lacustres antiguos. Las geoformas presentan marcadas diferencias de oeste a este de la unidad.

El sector noroeste -influenciado por las sierras- presenta un relieve moderado a suavemente ondulado, de acuerdo a la antigüedad de los ciclos eólicos involucrados. Las lomas más modernas se disponen en sentido de la pendiente regional, este y sudeste, con gradientes de hasta el 1 % y pendientes locales complejas que alcanzan el 3 % (Cantú y Degiovanni, 1984). El sector este y sur del área presenta la cubierta eólica antigua surcada por paleocauces -en la zona central- y afectada por derrames de arroyos -en su extremo oriental. Hacia el sudoeste el ciclo eólico está representado por médanos longitudinales aislados, algunos de los cuales se aproximan al cauce del río Cuarto. En general el relieve es subnormal con una pendiente general inferior al 0,5 %, con ondulaciones locales muy suaves que sólo son alteradas por la presencia de médanos. Presenta cuencas muy extensas, poco definidas por lo que frecuentemente los caminos funcionan como colectores principales, causando serios problemas de transitabilidad, generando riesgos de aluviones de agua y fango en muchas poblaciones. Este fenómeno se ve agravado por el inadecuado mantenimiento de los caminos vecinales, los que son permanentemente compactados y profundizados.

Hacia el oeste de la localidad de Río Cuarto existen áreas hidrohalomórficas localizadas (Cantero *et al.*, 1986) tales como la depresión de Colonia El Carmen (Cantú, 1998), un área suavemente ondulada compuesta por una sucesión de médanos longitudinales y sectores bajos. En estos últimos aflora la freática con alta concentración de sales, originando costras superficiales, sobre suelos salino-sódicos. Esta depresión da origen a dos afluentes del arroyo Santa Catalina, y tal como otras frecuentes en la unidad, presenta un origen tectónico ligado a la presencia de fallas regionales (Cantú y Degiovanni, 1984). Hacia el norte y el noreste de la sub-región se desarrollan las *llanuras bien drenadas con relieve subnormal* que abarcan dos subunidades diferenciadas: hacia el norte el área plana y elevada que constituye la divisoria de aguas entre las cuencas de los arroyos Tegua (N) y Carnerillo (S), y hacia el sur de este último y en dirección sudeste se diferencia un área caracterizada por la superposición de formas correspondientes a procesos genéticos diferentes, no coetáneos, aunque con rasgos eólicos predominantes.

La zona aledaña a las localidades de Gral. Cabrera - Gral. Deheza es una llanura de muy baja pendiente con materiales de origen eólico que presentan un gradiente

granulométrico de oeste a este, desde predominio de arenas muy finas (El Espinillal) hacia una mayor frecuencia de limos finos (Las Perdices). Los procesos de acumulación-deflación determinan áreas localizadas con mesorelieves donde no se observan líneas de escurrimiento definidas. En forma periférica respecto de esta área, el relieve comienza a ondularse suavemente, mostrando pequeñas lomas sin orientación preferencial y depresiones poco marcadas. Este tipo de transición se verifica en especial hacia el oeste (El Espinillal) y hacia el sur (Carnerillo), mientras que hacia el sudeste comienzan a observarse médanos longitudinales de generaciones diferentes -más o menos fijados por la vegetación natural- con distinto grado de desarrollo de suelos. Hacia el sur aparecen grandes lagunas interconectadas por el arroyo Chucul y separadas por médanos de rumbo NE-SW bien definidos, y en algunos sectores, pequeñas cubetas de deflación y lomas sin orientación definida (Cantú y Degiovanni, 1984).

II.2.2 Llanuras mal drenadas

Planicies y depresiones salino-sódicas

Se caracterizan por un contacto permanente de la superficie del suelo con la napa freática salina. En estos ambientes el principal recurso productivo y estabilizador



Imagen II.2: Planicies salino - sódicas

es la vegetación natural herbácea y arbustiva, compuesta por 130 especies halófitas y otras 258 especies con diversos grados de tolerancia a la salinidad y anegamiento (Imagen II.2). De acuerdo a su ubicación en el relieve local, los suelos pueden estar sometidos a salinización, o a alternancia de salinización - inundación - sedimentación.

El volumen de agua y sedimentación que llegan a estas depresiones ha provocado colmatación de las áreas más bajas, con la consecuente ampliación de la zona inundable y sedimentación en áreas periféricas con suelos con pocas restricciones de uso. En períodos secos estas planicies están sujetas a deflación eólica que dispersa sales en las áreas circundantes provocando salinización de suelos de posiciones más elevadas

en las áreas circundantes provocando salinización de suelos de posiciones más elevadas y buen potencial productivo, como así también removiliza sedimentos generando áreas medanosas.

Lagunas

Existen en la región alrededor de 1.400 lagunas, entre permanentes y temporarias, ocupando una superficie aproximada de 170.000 ha (Imagen II.3). En general son poco profundas y están caracterizadas por una gran variabilidad en concentración y tipo de sales (desde 2 a 45 g L⁻¹), reflejadas en la composición de la vegetación, de juncales y totorales en las primeras y pastizales altos de espartillo o praderas saladas de pelo de chanco en las zonas periféricas a las segundas. Las lagunas constituyen un recurso hídrico estratégico



para la producción animal del área. La contaminación salina se debe a la interconexión entre lagunas por canales de drenaje, entre lagunas de diferente salinidad, y al deterioro físico de los suelos, lo que incrementa los aportes de escurrimientos locales salinos. Varias de estas lagunas están en proceso de colmatación presentando áreas de bañados en sus bordes y/o evidencias de eutrofización.

II.2.3 Llanuras medanosas



Hacia los sectores norte y este de la sub-región, la base medanosa antigua presenta formas longitudinales de orientación noreste sudoeste (Imagen II.4), en forma de lomadas suaves de baja altura,

que presentan suelos poco desarrollados, más fácilmente discernibles en las fotografías aéreas que en el terreno. Hacia el sudoeste predomina un relieve de acumulación -

lomas suaves de baja altura, que presentan suelos poco desarrollados, más fácilmente discernibles en las fotografías aéreas que en el terreno. Hacia el sudoeste predomina un relieve de acumulación - deflación compuesto por lomas redondeadas y subredondeadas, de poca altura y de muy diverso tamaño. El patrón fotográfico presenta un aspecto de "viruela" (Cantú y Degiovanni, 1984). Entre el río Quinto y la ruta nacional n° 7 los médanos son más activos y de menor tamaño, recientes, y oscilan entre los 0,3 a 1,2 km de ancho (NO-SE) y entre 0,5 a 2,2 km de longitud, no muy elevados.

En el sector central del área y hacia el oeste son más abundantes los médanos modernos de mayor tamaño, y desarrollados a partir de los materiales que componen el relieve descrito anteriormente. Varían entre 1,5 a 2,3 km de ancho (NO-SE) y 3 a 6 km de largo, con un desnivel general de 20 a 30 m respecto de la llanura circundante. Frecuentemente se encuentran asociadas áreas de intensa deflación que, cuando su profundidad llega hasta el nivel freático, dan lugar a la formación de lagunas que normalmente se ubican hacia el noreste. Este hecho, sumado a la disposición de las ondulaciones en la parte activa del médano indica que la dirección de los vientos actuantes es noreste, aunque la presencia en algunos médanos de lagunas en la parte central y oriental indica la acción conjunta de estos vientos con los del sudeste (Cantú y Degiovanni, 1984).

En el sector noroeste, entre Justo Daract y Villa Mercedes, y desde el río Quinto hacia el norte, se extiende una llanura arenosa en parte loésica (Peña Zubiato, 1980) con médanos estabilizados, que incluye también áreas ligeramente deprimidas y fuertemente salinizadas. Su proyección hacia el oeste se torna en un relieve suavemente ondulado, mientras que hacia el sur predominan los médanos de origen antrópico (INTA, 1998). Se verifica en este sector el aporte reciente de cenizas volcánicas (1932) procedentes del sector andino y que predominan escasamente alteradas por las condiciones de semiaridez. Se encuentra en muchos casos entremezclada con sedimentos actuales otorgando una coloración blanca a los primeros centímetros del suelo (Peña Zubiato y Strasser, inédito).

II.2.4 Sierras y Pedemonte

Sierra de Comechingones

Pampas de altura: Situadas por encima de 1.500 msnm; son las áreas con las menores pendientes, suelos bien desarrollados, en muchos casos sobre materiales

loésicos, con profundidades que superan los 80 cm, horizontes texturales y altos contenidos de materia orgánica. El proceso activo dominante es la erosión hídrica con cárcavas de gran envergadura, potenciadas por el uso pecuario.

Áreas de relieve escarpado: Esta unidad ocupa aproximadamente el 70 % de

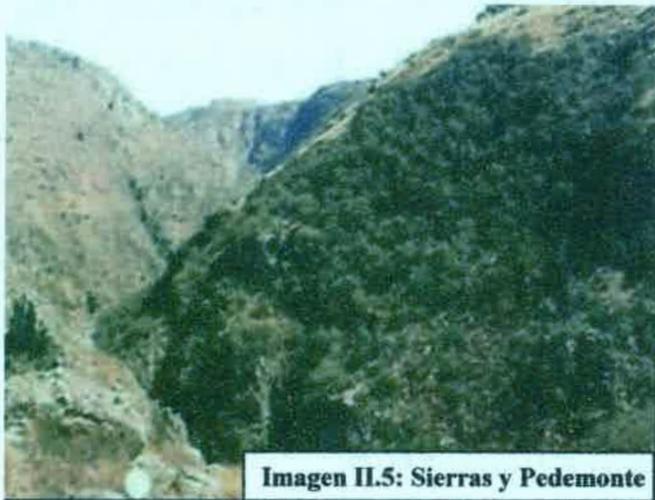


Imagen II.5: Sierras y Pedemonte

todo el ambiente serrano y constituye el área de nacientes de varios cursos del Sur de Córdoba (Imagen II.5). En los interfluvios afloran rocas de basamento sobre las que se desarrollaron suelos someros, pedregosos, que no superan los 10 cm de profundidad. Dominan procesos de remoción en masa y erosión fluvial.

Áreas de relieve suavizado: Están representadas en el borde oriental y Sur de las Sierras. Los interfluvios presentan pendientes moderadas y desarrollo edáfico somero. En los valles se desarrollan cárcavas parcialmente integradas en una red de drenaje en proceso de reinstalación. En algunos sectores se observan mallines con suelos muy orgánicos aunque tienen poca expresión areal.

Ríos y arroyos: Presentan en general valles angostos, escarpados profundos, lechos rocosos, erosivos con saltos, rápidos, ollas y régimen turbulento. En algunos sectores, de menor relieve, tienen un lecho areno-graviloso y algunos niveles de terrazas. Constituyen verdaderos ecosistemas, sometidos a una alta dinámica hidrológica, producto de crecientes cortas e intensas lo que caracteriza un régimen de tipo torrencial. Esta situación se ve agravada porque a los caudales pico en épocas de lluvia se suman gran cantidad de sedimentos de granulometría variada producto de los procesos de erosión hídrica y remoción en masa. Se destaca que, tanto las aguas superficiales como subterráneas tienen muy baja concentración de sales, con promedios de 200 mg L⁻¹. Son aguas predominantemente bicarbonatadas cálcicas y, en general, aptas para diversos usos.

Pedemonte

La zona pedemontana se caracteriza por un relieve fuertemente ondulado con pendientes del orden del 2 al 12 %, donde afloran materiales coluviales, aluviales en

algunas lomadas relícticas mientras que la mayor parte del área está cubierta por sedimentos eólicos arenosos muy finos a limosos. Toda el área está sometida a uso ganadero y es la frontera oeste de avance de la agricultura. Estas condiciones lo convierten en un ambiente de alta susceptibilidad a la erosión fundamentalmente hídrica, presentando rasgos de distinta envergadura, desde manchas ocasionadas por la erosión laminar hasta cárcavas ramificadas de gran tamaño.

II.3 Información climática

Tabla II.1: Temperaturas medias y precipitación anual medida en algunas localidades dentro de las cuatro sub-regiones.

Localidad	Temperatura media (°C)			Precipitación anual (mm)			Fuente
	Media	Mínima	Máxima	Media	Desvío	Período	
<i>Llanuras bien drenadas</i>							
Gral. Deheza	16,5	9,6	22,8	763	44	1951-91	[1]
Río Cuarto	16,5	8,8	23,5	790	35	1974-93	[2]
La Aguada	16,6	9,8	23,3	822	48	1994-99	[2; 3]
<i>Llanuras mal drenadas</i>							
Laboulaye	16,6	10,1	24,7	754	162	1903-73	[4]
Pacheco de Melo	16,2	9,8	23,4	725	171	1917-90	[4]
<i>Llanuras medanosas</i>							
B. Esperanza	15,4	6,7	24,0	489	29	1921-50	[1]
V. Mercedes	16,3	7,9	24,7	664	151	1961-90	[5]
V. Mackenna	17,3	8,8	25,8	815	198	1994-99	[2]
<i>Sierra y pedemonte</i>							
700 msnm	14,9	4,6	25,1	860	142	1994-99	[6]
1400 msnm	12,7	-0,4	25,9	1100	370	1994-97	[6]

Fuente: [1] De Prada *et al.*, 1994; [2] Cátedra de Climatología, UNRC; [3] Cantú, 1998; [4] Cisneros, 1994; [5] Cátedra de Climatología, UNSL; [6] González, 1999.

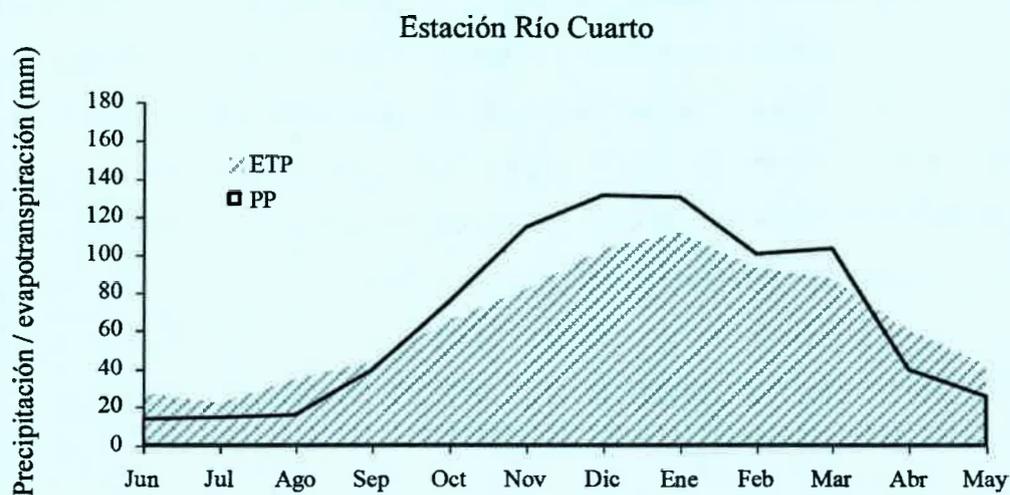


Figura II.2: Precipitaciones medias mensuales (PP) y evapotranspiración potencial (ETP) según Thornwaite (1967) en la estación meteorológica de la Universidad Nacional de Río Cuarto ($64^{\circ} 14' O$; $32^{\circ} 07' S$; 421 msnm), Pcia. Córdoba, período 1974 – 1993.

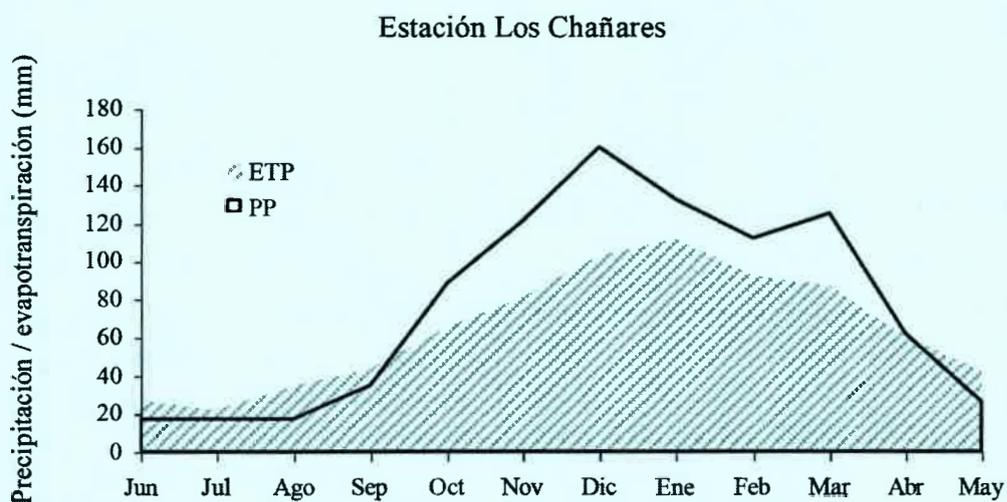


Figura II.3: Precipitaciones medias mensuales (PP) y evapotranspiración potencial (ETP) según Thornwaite (1967) en Los Chañares ($64^{\circ} 43' O$; $33^{\circ} 01' S$; 775 msnm), Pcia. Córdoba, período 1941 – 1994. Para el cálculo de la ETP se utilizaron los registros de temperatura de la localidad de Río Cuarto.

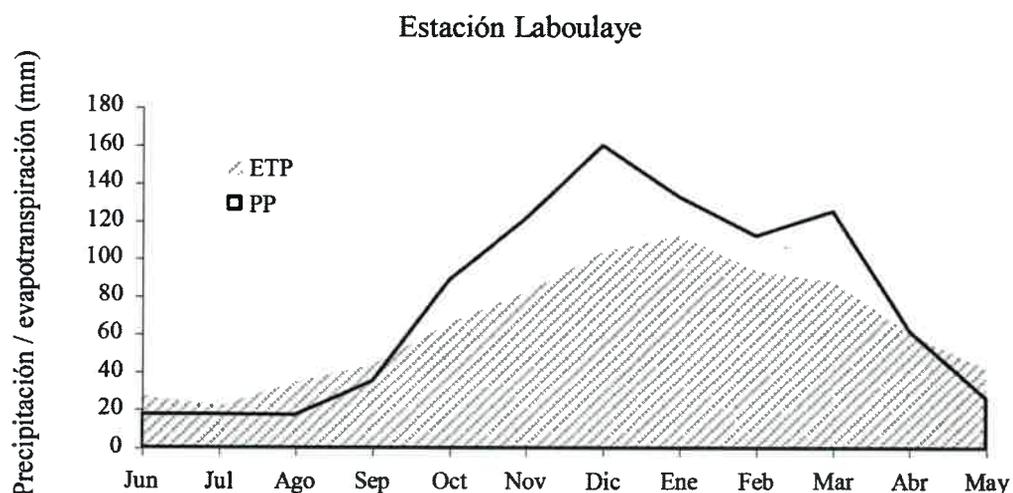


Figura II.4: Precipitación media mensual y evapotranspiración potencial calculada según Thornwaite para la localidad de Laboulaye, Pcia. Córdoba ($63^{\circ} 24' O$; $34^{\circ} 08' S$; 138 msnm), durante el período 1921 – 1956.

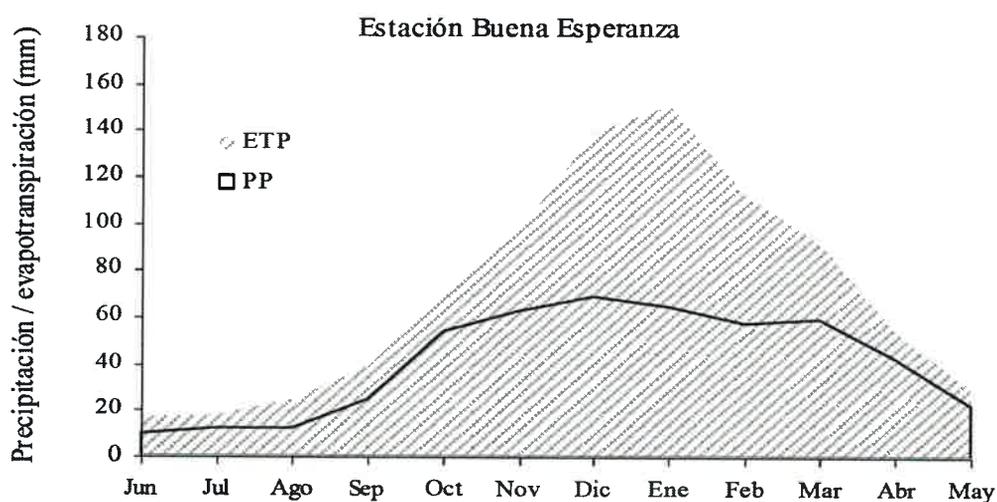


Figura II.5: Precipitaciones medias mensuales (PP) y evapotranspiración potencial (ETP) según Thornwaite (1967) en la estación meteorológica de Buena Esperanza ($65^{\circ} 18' O$; $34^{\circ} 39' S$; 320 msnm), Pcia. San Luis, durante el período 1921 - 1950.

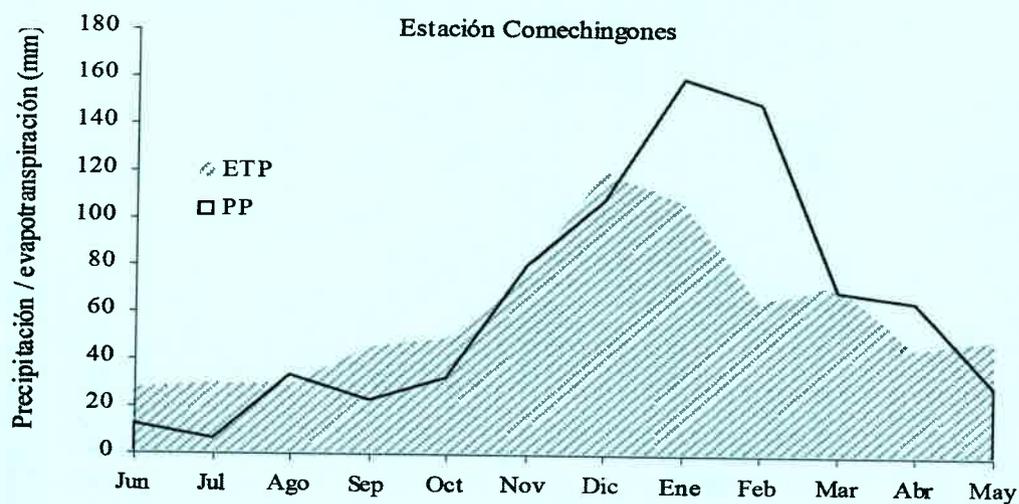


Figura II.6: Precipitaciones medias mensuales y evapotranspiración potencial (Thornwaite, 1967) en la estación meteorológica de Comechingones ($64^{\circ} 54' O$; $32^{\circ} 41' S$; 1420 msnm), Pcia. Córdoba, durante el período 1994 – 1997.

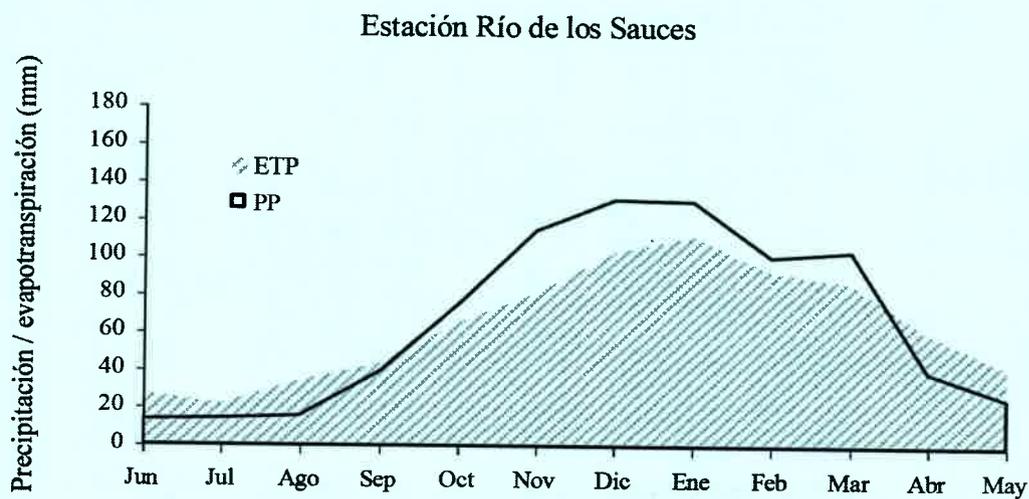


Figura II.7: Precipitaciones medias mensuales y evapotranspiración potencial (Thornwaite, 1967) en la estación meteorológica de Río de los Sauces ($64^{\circ} 35' O$; $32^{\circ} 32' S$; 723 msnm), Pcia. Córdoba, para el período 1970 – 1992.

II.4 Formaciones vegetales

II.4.1 Llanuras bien drenadas

II.4.1.1 “Estepa gramínea con isletas de quebracho blanco”

Ocupa la porción oeste y es una continuación de la que Anderson *et al.* (1970) llamaron para San Luis “Ecotono bosque de quebracho blanco y algarrobo - bosque de caldén” (Imagen II.6). El paisaje presenta afloramientos rocosos y



lomas, con pendientes cortas de 7 a 10 %, y el elemento leñoso característico es el quebracho blanco (*Aspidosperma quebracho-blanco*) acompañado por caldén (*Prosopis caldenia*), algarrobo negro (*Prosopis flexuosa*) y moradillo (*Schinus fasciculatus*). La composición florística de esta formación se describe en detalle para la sub-región Llanuras medanosas.

II.4.1.2 “Estepa gramínea” (Bianco *et al.*, 1987)

Abarca la mayor parte de la sub-región, y es la más modificada antrópicamente, presentando el menor porcentaje de vegetación nativa, la cual se manifiesta preferentemente en vías férreas, caminos vecinales, lotes abandonados y áreas con cárcavas profundas. El elemento leñoso ha desaparecido casi por completo, observándose ocasionalmente algarrobos o espinillos (*Acacia caven*) aislados. El aspecto fisonómico de la vegetación original era el de una sabana arbolada que rodeaba a otra formación gramínea, constituyendo bosques abiertos caducifolios y micrófilos, fragmentados internamente por pastizales.

La comunidad predominante actual es el flechillar (Imagen II.7), donde son frecuentes las especies del género *Stipa*, cuya distribución responde en general a los tipos de suelo: sobre texturas más finas habitan *Stipa brachychaeta*, *S. trichotoma*, *S. neesiana* y *S. papposa*, mientras que en suelos de texturas más gruesas son sustituidas por *S. eriostachya*, *S. tenuissima* y *Piptochaetum napostense*. Son frecuentes el pasto horqueta (*Paspalum notatum*) y la poa (*Poa ligularis*), ambas excelentes forrajeras, y en muy raras ocasiones es posible encontrar al pasto de vaca (*Sorghastrum pellitum*).

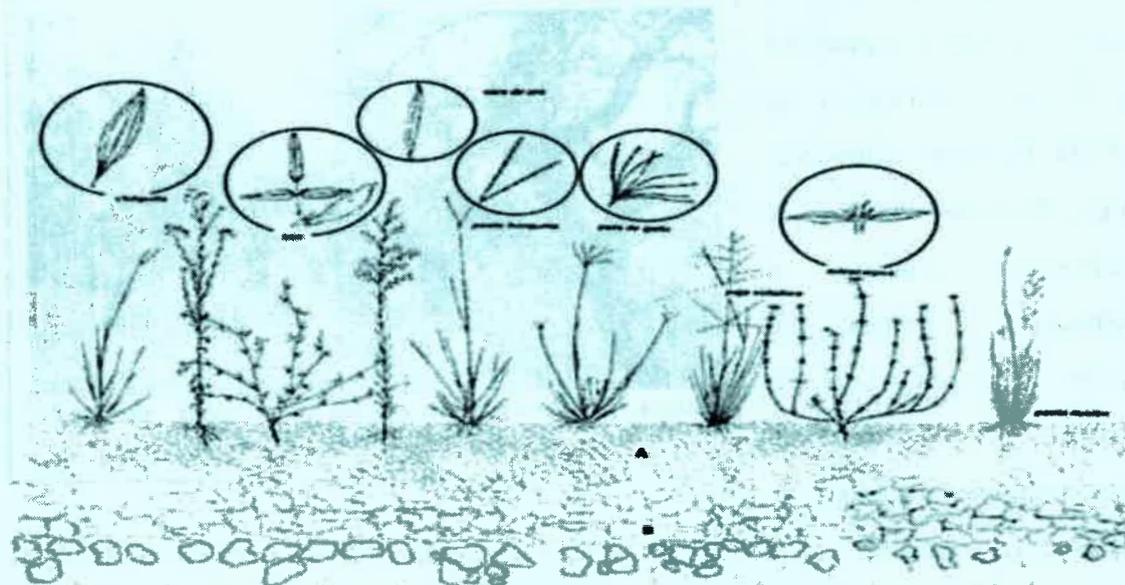


Imagen II.7: Vegetación de las "Llanuras bien drenadas". Proximidades del río Cuarto. Dpto. Río Cuarto

II.4.1.3 "Bosques marginales" (Bianco *et al.*, 1987)

Restringidos a las márgenes de los principales cursos de agua, se componen de especies típicas de la "Provincia del espinal" y algunas pocas del "Chaco serrano" que descienden por dichos cursos. El elemento leñoso está integrado por sauces (*Salix humboldtiana*) en los sectores más húmedos, mientras que en la parte superior de las barrancas habitan el tala (*Celtis tala*), el chañar (*Geoffroea decorticans*), y el espinillo (*Acacia caven*), entre otros.

II.4.2 Llanuras mal drenadas

La comunidad de *Stipa tenuissima* - *Stipa papposa* (nodum A), un pastizal alto y cerrado dominado por estas especies, se ubica en las posiciones topográficas más

elevadas, como lomas arenosas plano-conexas. Representa el extremo más seco y menos salino del gradiente fitosociológico. En posiciones topográficas relacionadas, con pendientes aún mayores al 0,5 %, es posible encontrar a la comunidad de *Chloris canterai* (nodum B), en sitios sujetos a escurrimientos medios a rápidos y a condiciones de permeabilidad moderada a buena. Hacia las pendientes plano-convexas contiguas, con microrelieves irregulares pero aún con relativamente buen drenaje interno, aparece como un pastizal bajo y cerrado la comunidad de *Cynodon dactylon* (nodum C), con numerosas especies provenientes de las comunidades contiguas.

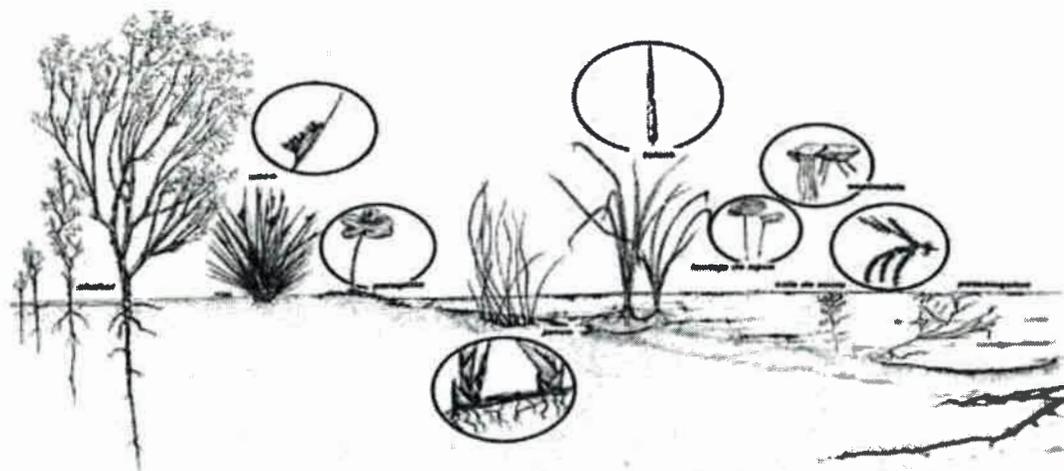


Imagen II.8: Vegetación de "Lagunas". Laguna "El Tunal". Dpto. Río Cuarto

La comunidad de *Geoffroea decorticans* - *Grabouwskia duplicata* (nodum D) es una formación leñosa con cobertura variable que se localiza en las posiciones topográficas más bajas, en antiguos albardones, y con frecuencia en costas de lagunas. Se lo define como un monte denso pluriestratificado con un estrato inferior predominantemente herbáceo y los superiores leñosos (Cantero y Petryna, 1998). También en albardones arenosos rodeando lagunas permanentes, o en paleocauces ubicados en posiciones topográficas intermedias, aparece como un pastizal alto y de elevada cobertura la comunidad de *Pappophorum caespitosum* - *Muhlenbergia asperifolia* (nodum E), predominando la primera de las especies.

Tanto en áreas de recepción como de tránsito de escurrimientos salinos aparece la comunidad de *Distichlis scoparia* (nodum F) como un pastizal bajo y cerrado, que normalmente limita hacia posiciones periféricas más bajas con la comunidad de

Distichlis spicata (nodum J), de cobertura más variable y ligado a relieves subnormales o cóncavos, con pendientes menores a 0,2 %. La comunidad de *Spartina densiflora* (nodum L) es un pastizal alto, cerrado o abierto, que aparece en relieves cóncavos de baja permeabilidad, con la freática superficial y acumulación de escurrimientos salinos. Los límites entre las dos últimas comunidades presentan un carácter cíclico ligado a inundaciones. En ambientes intermedios algo más plano-convexos, cuando la freática se encuentra desconectada de la fuente salina debido a discontinuidades litológicas en el perfil, aparece como un pastizal alto y cerrado la comunidad de *Cyperus corymbosus* (nodum K).

En ambientes con relieves muy suaves, en planos intermedios, plaeocauces o áreas perilacunares, con frecuencia en albardones o elevaciones arenosas incipientes, es posible encontrar a las comunidades de *Atriplex undulata* (nodum G) y de *Salicornia ambigua* (nodum I), de notable similaridad florística y ligadas a condiciones de elevada salinidad (especies tolerantes a salinidad extrema). Ambas presentan la fisonomía de arbustal, aunque más alto y cerrado en el primer caso, y con mayor proporción de suelo desnudo en el segundo. La comunidad de *Heterostachys ritteriana* (nodum H) es un arbustal bajo que aparece limitando con las anteriores pero restringida a paleocauces dentro de áreas plano-cóncavas, con pendientes menores a 0,3 % y sobre suelos de baja permeabilidad, con escurrimientos lentos, anegados o inundados. Las comunidades de *Schoenoplectus californicus* (nodum M) y de *Echinochloa helodes* (nodum N) aparecen como pastizales altos abiertos o cerrados en microdepresiones y cubetas, donde los aportes hídricos por escurrimiento superficial o hipodérmico presentan baja salinidad. La primera de ellas está asociada a regímenes de inundación más prolongados que la segunda, o permanentes, provocados por napas locales (Imagen II.8).

II.4.3 Llanuras medanosas

Son frecuentes en las planicies intermedanasas los caldenes (*Prosopis caldenia*) aislados, el alpataco (*Prosopis alpataco*), el peje (*Jodina rhombifolia*) y en sitios con mayor humedad edáfica aparece el tala (*Celtis tala*), entre las leñosas (Imagen II.9). El olivillo (*Hyalis argentea*) -indicador de suelos degradados-, el romerillo (*Senecio subulatus*) y el piquillín de las víboras (*Lycium chilense*) son los arbustos más comunes. La composición florística del estrato herbáceo varía en relación al manejo del pastoreo,

sólo en ciertas extensiones muy poco alteradas especialmente hacia el oeste de la sub-región es posible observar un estado cercano al climáxico, dominado por el pasto de vaca (*Sorghastrum pellitum*), acompañado por paja amarga (*Elyonorus muticus*), el pasto escoba (*Schizachyrium plumigerum*), el penacho blanco (*Bothriochloa springfieldii*) y el pasto ilusión (*Eragrostis lugens*), entre otras, todas ellas gramíneas de muy buen valor forrajero (Anderson, 1970).

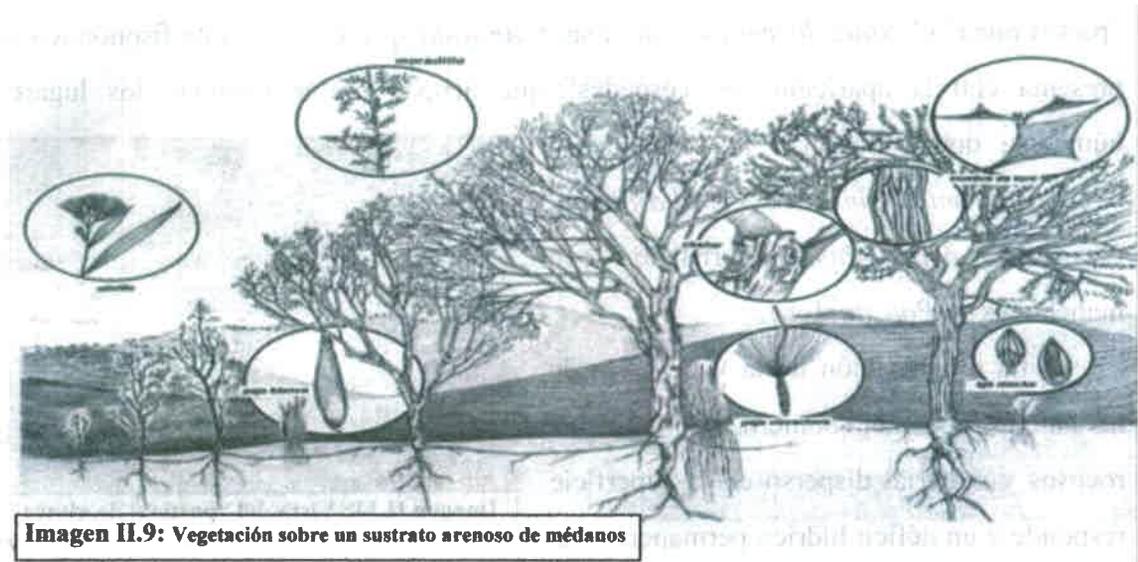


Imagen II.9: Vegetación sobre un sustrato arenoso de médanos

La composición florística más comúnmente observada en los pastizales, especialmente hacia el este y norte de la sub-región, incluye en el estrato herbáceo a la paja vizcachera (*Stipa eriostachya*), la paja blanca (*Stipa tenuissima*), cortadera chica (*Pappophorum pappiferrum*), paja amarga, pata de gallo (*Chloris retusa*), flechilla negra (*Piptochaetium napostaense*) y la poa (*Poa ligularis*). En médanos en vías de fijación las pioneras más comunes son el ajo macho (*Panicum urvillanum*) y el unquillo (*Poa lanuginosa*) (Bianco *et al.*, 1987). En áreas que han sido sometidas a cultivo y luego abandonadas o en situaciones de degradación aparecen el cardo ruso (*Salsola kali*), la quinoa (*Chenopodium album*), el tupe (*Panicum urvilleanum*) y la saetilla (*Aristida adscencionis*), entre otras herbáceas, al olivillo entre las arbustivas y al chañar representado por ejemplares de bajo porte (Orquin *et al.*, 1985) (Imagen II.10).



Imagen II.10: Isletas de chañar

II.4.4 Sierra y Pedemonte

Las “Estepas gramíneas” o “Pastizal serrano” (Imagen II.11) ocupan preferentemente las zonas llanas, “pampas de altura”, con suelos profundos, ricos en materia orgánica y con presencia de cárcavas de diferente magnitud. Desde el punto de vista ganadero son las más importantes, extendiéndose desde los 900 hasta los 2.000 msnm. La fisonomía corresponde a la de una estepa, con predominio de “pajas” y “pastos puna” (*Festuca hieronymi*, *Stipa* sp. y *Aristida* sp.). Una variante fisonómica se presenta con la aparición de “céspedes” que ocupan preferentemente los lugares húmedos, donde dominan la yerba de la oveja (*Alchemilla pinnata*), *Azorella biloba*, *Eryngium agavifolium* alternando con manchones de *Poa stuckerti*.



Imagen II.11: Vista del “pastizal de altura”

La organización de la vegetación de las laderas, con suelo somero, afloramientos rocosos y material disperso en la superficie responde a un déficit hídrico permanente. La fisonomía corresponde a un pastizal bajo, estepario, predominando *Sorghastrum pellitum*. En los fondo de valles y mallines, ambientes receptores de flujos superficiales e hipodérmicos provenientes de geosistemas superiores, la vegetación presenta formas de vida adaptadas a condiciones de anegamiento e inundación. Estos sitios poseen la diversidad florística más baja y son dominados por las familias *Cyperaceae* y *Poaceae*, especies rizomatosas con presencia de tejidos aerenquimáticos (González, 1999).

El “Arbustal” o “Romerilla” se manifiesta a partir de los 800 msnm llegando a veces hasta las partes más altas del cordón serrano. Presenta el aspecto de un matorral bajo que aparece en forma continua o en manchones, o como mosaico dentro de la estepa de altura o en el bosque serrano (Bianco *et al.*, 1987), ocupando preferentemente sitios con rocas expuestas, laderas ventosas y secas, con suelos poco profundos o incipientes. Las especies dominantes son los romerillos (*Heterothalamus alienus* y *Eupatorium buniifolium*), en algunos sitios domina la carquejilla (*Baccharis articulata*).

El “Bosque serrano” (Imagen II.12) ocupa preferentemente ambientes húmedos y protegidos de los vientos como márgenes de cursos de agua, quebradas profundas, y se caracteriza por ser en general un bosque muy abierto. La especie dominante es el molle

de beber (*Lithraea ternifolia*) acompañado por ejemplares más o menos aislados de coco (*Fagara coco*). El “Monte serrano” ocupa la parte basal del cordón serrano, presenta un grado variable de densidad, y la especie dominante es el espinillo (*Acacia caven*) de 1 a 3 m de altura, acompañado por otras especies leñosas tales como moradillo (*Schius fasciculatus*), tala (*Celtis tala*), coco, poleo (*Lipia turbinata*) y palo amarillo (*Aloysia gratissima*).



Imagen II.12: Vegetación del “Bosque Serrano”. Proximidades del Cerro Pelado. Dpto. Calamuchita

U.N.R.C.
Biblioteca Central



68858

68858

