

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE
RIO CUARTO**

**FACULTAD DE AGRONOMIA Y
VETERINARIA**

Trabajo final para optar al Grado
de Ingeniero Agrónomo

Título:

**“Influencia de la napa freática en la productividad del cultivo de maíz
en ambientes representativos de la zona de Buchardo”**

**Por: Mihanovich, Juan Carlos
DNI: 30.803.026**

**Director: Cisneros, José Manuel
Codirector: Espósito, Gabriel**

**Río Cuarto – Córdoba
Diciembre 2010**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA**

CERTIFICADO DE APROBACIÓN

***INFLUENCIA DE LA NAPA FREÁTICA EN LA PRODUCTIVIDAD
DEL CULTIVO DE MAÍZ EN AMBIENTES REPRESENTATIVOS
DE LA ZONA DE BUCHARDO***

**ALUMNO: JUAN CARLOS MIHANOVICH
D.N.I. 30.803.026**

**DIRECTOR: ING. AGR. MSC JOSE MANUEL CISNEROS
CODIRECTOR: ING. AGR. GABRIEL ESPOSITO**

Aprobado y corregido de acuerdo con las sugerencias de la Comisión Evaluadora:

ING. AGR. DR. AMERICO JOSE DEGIOANNI _____

ING. AGR. MSC. MIGUEL REYNERO _____

ING. AGR. MSC. JOSE MANUEL CISNEROS _____

Fecha de Presentación: ____/____/____.

Aprobado por Secretaría Académica: ____/____/____.

Secretario Académico

A la memoria de mis abuelos Fernando y Carlos.

A mis abuelas, Sylvia y Raquel.

Mis padres Juan Carlos y Clara.

Mis hermanos Sebastian y Clara.

Y a toda mi familia.

Agradecimientos:

Agradezco a Dios por permitirme llegar a esta instancia.

A mi director y co-director de tesis José Manuel Cisneros y Gabriel Espósito quienes me guiaron durante la realización del presente trabajo.

A Bracorp S.A.

A José Ignacio, Sebastian, Juan José, Joaquín, Andrea y a mis primos Enrique y Pablo.

Y a todos aquellos que de alguna manera me ayudaron a realizar este trabajo.

Índice general.

RESUMEN	1
SUMMARY	2
I. INTRODUCCIÓN:	3
II. ANTECEDENTES	4
II.1. Fisiología del cultivo de maíz.	4
II.2. Importancia de la napa como recurso hídrico y factor desestabilizador	5
II.3. Influencia de la napa freática sobre los cultivos en general.	6
III. HIPÓTESIS:	8
IV. OBJETIVOS:	8
IV.1. Objetivo general:	8
IV.2. Objetivos específicos:	8
V. MATERIALES Y MÉTODOS:	9
V.1. Caracterización del área de estudio.	9
V.2. Diseño experimental	9
V.3. Observaciones y mediciones	10
V.3.1. Suelo:	10
V.3.2. Clima:.....	10
V.3.3. Agua subterránea:	10
V.3.4. Cultivo:	10
V.3.5. Interpretación de los resultados:.....	11
VI. RESULTADOS	12
VI.1. Condición climática durante el desarrollo del cultivo.	12
VI.1.1. Precipitaciones	12
VI.1.2. Balance hidrológico.	13
VI.1.3. Temperaturas	14
VI.2. Descripción de suelos	16
VI.2.1. Suelos del Bajo.	16
VI.2.2. Suelos de la Media Loma Baja, Media Loma Alta y Loma.....	18
VI.3. Dinámica de la napa freática.	19
VI.3.1. Profundidad de la napa freática.....	19
VI.3.2. Salinidad del agua de la napa freática (C.E.)	23
VI.3.3. Ajuste del nivel freático a modelos de predicción.	25
VI.4. Dinámica de la humedad, salinidad y pH del suelo.	28
VI.4.1. Humedad gravimétrica del suelo.	28
VI.4.2. Salinidad del suelo.	30
VI.4.3. pH del suelo.	32
VI.5. Comportamiento del cultivo de maíz en relación a la posición en la toposecuencia.	34
VI.5.1. Densidad de plantas.	34
VI.5.2. Materia seca aérea.....	34
VI.5.3. Rendimiento, IC, tasa de crecimiento y componentes del rendimiento.	37
VI.5.4. Dinámica de crecimiento de raíces y su relación con la napa freática.	40
CONCLUSIONES	45

<i>BIBLIOGRAFÍA:</i>	46
<i>ANEXO:</i>	48
Análisis de la varianza	48

Indice de Figuras

<i>Figura 1: Promedio de precipitaciones mensuales para La Vanguardia, período 1910-2009.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 2: Precipitaciones para el ciclo del cultivo comparadas con las precipitaciones medias históricas.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 3: Balance hidrológico mensual para Buchardo.</i>	<i>14</i>
<i>Figura 4: Temperaturas medias, máximas medias y mínimas medias para el área según Carta de Suelos del INTA, Hoja Buchardo año 2000.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 5: Temperaturas medias, máximas y mínimas durante el periodo del cultivo de octubre del 2008 a junio del 2009.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 6: Profundidad de la napa durante el periodo de estudio de la misma para cada freatímetro correspondiente a cada ambiente.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 7: Vista general del bajo que quedó anegado después de la lluvia.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 8: Cota del terreno y cota de la napa.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 9: Ubicación geográfica de los freatímetros y representación de la pendiente estimada de la napa.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 10: relación entre la profundidad promedio de la napa y la C.E. promedio de la misma.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 11: C.E. del agua de la napa para cada ambiente durante el periodo de seguimiento de la napa.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 12: Comparación de profundidad de la napa observada y simulada con el modelo de predicción para la zona del Bajo.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 13: Comparación de profundidad de la napa observada y simulada con el modelo de predicción para la zona de la Media Loma Baja.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 14: Comparación de profundidad de la napa observada y simulada con el modelo de predicción para la zona de la Media Loma Alta.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 15: Comparación de profundidad de la napa observada y simulada con el modelo de predicción para la zona de la Loma.</i>	<i>27</i>
<i>Figura 16: % de humedad gravimétrica para los diferentes estadios en el Bajo. Napa freática promedio a 207 cm de profundidad. Máx. 273 cm y mín. 137 cm.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 17: % de humedad gravimétrica para los diferentes estadios en la Media Loma Baja. Napa freática promedio a 213 cm de profundidad. Máx. 258 cm y mín. 158 cm.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 18: % de humedad gravimétrica para los diferentes estadios en la Media Loma Alta. Napa promedio a 290 cm de profundidad. Máx. 336 cm y mín. 238 cm..</i>	<i>29</i>
<i>Figura 19: % de humedad gravimétrica para los diferentes estadios en la Loma. Napa freática promedio a 360 cm de profundidad. Máx. 398 cm y mín. 315 cm.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 20: C.E. del extracto saturado para el ambiente del bajo.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 21: C.E. del extracto saturado para el ambiente de la media loma baja.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 22: C.E. del extracto saturado para el ambiente de la media loma alta.</i>	<i>31</i>

<i>Figura 23: C.E. del extracto saturado para el ambiente de la loma.</i>	31
<i>Figura 24: pH del suelo del bajo.</i>	33
<i>Figura 25: pH del suelo de la media loma baja.</i>	33
<i>Figura 26: pH del suelo de la media loma alta.</i>	33
<i>Figura 27: pH del suelo de la loma.</i>	33
<i>Figura 28: evolución del peso de biomasa aérea a través del tiempo para cada ambiente.</i>	35
<i>Figura 29: Relación entre TCC y Número de granos por m².</i>	37
<i>Figura 30: Rendimiento en Kg. de grano por hectárea para cada ambiente.</i>	38
<i>Figura 31: Índice de cosecha para el ambiente correspondiente a cada ambiente.</i> ...	39
<i>Figura 32: Peso de 100 granos correspondientes para cada ambiente.</i>	39
<i>Figura 33: Número de granos por m² correspondientes a cada ambiente.</i>	40
<i>Figura 34: Representación gráfica de la profundidad de raíces, napa y ascenso capilar para la situación del Bajo.</i>	41
<i>Figura 35: Representación gráfica de la profundidad de raíces, napa y ascenso capilar para la situación de la Media Loma Baja.</i>	41
<i>Figura 36: Representación gráfica de la profundidad de raíces, napa y ascenso capilar para la situación de la Media Loma Alta.</i>	42
<i>Figura 37: Representación gráfica de la profundidad de raíces, napa y ascenso capilar para la situación de la Loma.</i>	42

Indice de Tablas

<i>Tabla 1: Balance hidrológico para la zona de Buchardo. (mm)</i>	<i>14</i>
<i>Tabla 2: Temperaturas para la zona de Buchardo. (mm)</i>	<i>14</i>
<i>Tabla 3: datos analíticos Serie Pincén</i>	<i>17</i>
<i>Tabla 4: datos analíticos Serie Buchardo.</i>	<i>19</i>
<i>Tabla 5: Conductividad eléctrica en dS/m del agua de la napa para el ciclo del cultivo de maíz. Datos tomados con frecuencia quincenal aproximadamente.....</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 6: ecuaciones y R² de la relación entre los valores de profundidad de la napa observados y simulados con el modelo de predicción para cada ambiente.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 7: Biomasa acumulada para el cultivo de maíz en 4 situaciones de napa freática y profundidad de la napa para cada estadio.....</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 8: producción de materia seca por hectárea, agua consumida por el cultivo, precipitaciones durante el ciclo del cultivo y aporte de agua del suelo, según EUA de Gregoret et al. (2006).</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 9: producción de materia seca por hectárea, agua consumida por el cultivo, precipitaciones durante el ciclo del cultivo y aporte de agua del suelo, según EUA de Andrade y Sadras (2002), considerando un 30 % de evaporación.</i>	<i>44</i>

RESUMEN

Los suelos del sur de la provincia de Córdoba en el departamento General Roca corresponden a la Pampa Arenosa Anegable, en los cuales hay periodos en que algunas zonas tienen problemas de anegamiento de los bajos a consecuencia de las lluvias y el consecuente aumento del nivel freático, éste a su vez de ve influenciado por el cauce del Río Quinto o Popopis. En años secos estos bajos suelen tener problemas de salinidad y alcalinidad. En los últimos años con el desplazamiento de la ganadería a zonas marginales y el conjunto aumento de la superficie agrícola, gran porcentaje de áreas bajas con riesgos de inundación han sido incluidas al uso de la agricultura. Este aumento de la superficie agrícola se debió a la mejor rentabilidad de la agricultura y al desarrollo de nuevas formas de producción con las cuales se aumentaron los rendimientos y posibilidades de trabajar nuevas zonas con un eficiente aprovechamiento del agua, el cual es uno de los factores limitantes para la producción en esta zona. Este trabajo estudia la posibilidad del cultivo de maíz de aprovechar el agua de la napa como una fuente de agua complementaria al de las precipitaciones. Para dicho estudio se evaluaron factores que determinan si es probable dicho aprovechamiento en forma favorable. Se analizaron las profundidades críticas y aprovechables de la napa, salinidad (C.E.) del agua de la napa y la oscilación de la misma en el tiempo y su relación con el rendimiento del cultivo de maíz para cuatro niveles de napa diferentes siendo Bajo, Media Loma Baja, Media Loma Alta y Loma; para su estudio también se analizaron la salinidad, pH y contenido hídrico del suelo en distintos estadios de desarrollo del cultivo. Se obtuvieron datos climáticos (precipitaciones, temperatura y evapotranspiración) para establecer relaciones entre el cultivo y el agua de la napa. Se utilizó un modelo de simulación de la profundidad de la napa para comparar dichos resultados con los observados a campo. Los rendimientos fueron significativamente superiores para la situación correspondiente a la Media Loma Baja donde la napa tuvo un promedio de 213 cm de profundidad con una máxima profundidad de 258 cm y una mínima de 158 cm con una diferencia media de casi 5300 kg/ha con el rendimiento de la Loma. Los rendimientos inferiores fueron para la situación donde la napa no tuvo efecto sobre el cultivo ya que se encontró a una profundidad media de 360 cm. En el caso del bajo la productividad se vio afectada por un nivel freático cercano al crítico con un promedio de 207 cm y un mínimo de 137 cm; y con la presencia de un período de anegamiento por una napa colgada manifestándose este factor como determinante para la producción de maíz. La salinidad promedio del agua de la napa siguió un claro gradiente entre bajo y loma, con valores entre 0,914 dS/m y 13,995 dS/m respectivamente. Se concluye que sólo en la media loma baja la napa produjo un aporte importante de agua al cultivo, y que ambientes con napas por encima de 1,4 m de profundidad, con periodos cortos de anegamientos resultan limitantes para el cultivo de maíz.

SUMMARY

The soils of the southern province of Córdoba in the General Roca department correspond to the Sandy Floodplain Pampa, in which there are periods when some areas have flooding periods in the low zone as a result of rainfall and the consequent rise in water table, this in turn influenced by the Río Quinto or Popopis. In dry years these low-lands tend to have problems of salinity and alkalinity. In recent years, with the livestock displacement to marginal areas and the overall increase in agricultural area, a large percent of low-lying areas subject to flood risk have been included in agricultural use. This increase of the agricultural area was due to the improved profitability of agricultural and the development of new forms of productions which increased yields and possibilities to work new areas with efficient water use, which is one of the factors limiting production in this area. This paper studies the possibility of corn crop to take advantage of the water of the table water as a source of complementary water to precipitation. For this study we evaluated factors that determine if such use is probable in favorable form. We analyzed the critical and usable depths of the table water, salinity (E.C.) of the water of the table water and oscillation over time and its relation to crop yield of maize for four different table water levels (WT): hill (low WT), medium hill (intermediate high WT), middle lowlands (intermediate low WT) and lowland (high WT); for this study also we examined the salinity, pH and soil water content at different stages of crop development. We obtained climatic data (precipitation, temperature and evapotranspiration), to establish relationships between crop and water of the table water. We used a simulation model of the depth of the water table to compare the results with the observed field. Yields were significantly higher for the situation of middle lowland where the water had average of 213 cm deep with maximum depth of 258 cm and a minimum of 158 cm with a mean difference of yield of almost 5300 kg/ha with the Knoll. The lower yields were for the situation where the water had no effect on the crop and was found at an average depth of 360 cm. In the case of the lowland the productivity was affected by a water table close to critical with an average of 207 cm and a minimum of 137 cm and the presence of a period of waterlogging by dangling water table demonstrating this factor as a determinant to maize production. The average water salinity of the water table has followed by a clear gradient between the lowland and hill, with values ranging from 0.9 dS/m and 13.9 dS/m respectively. It is concluded that the groundwater in middle lowland was an important contribution of water to the crop, and environments with groundwater above 1.4 m deep, with short periods of flooding are limited to the maize crop.

I. INTRODUCCIÓN:

Los suelos de la pampa arenosa anegable del sudeste de la provincia de Córdoba se caracterizan por su susceptibilidad a las inundaciones y anegaciones temporarias, por lo general en la estación de verano por las altas precipitaciones, la crecida del río popopis (río quinto) y por estar afectados por una capa freática superficial con diferente nivel de salinidad, y también por períodos de déficit hídrico, en las que la zonas inundables presentan sales en superficie y en la que la falta de agua es una limitante importante para la producción.

Estos fenómenos afectan estos suelos de la región provocando grandes pérdidas de producción, tanto en agricultura como en ganadería.

Las limitantes al consumo de agua son el principal factor responsable de las pérdidas de rendimiento de los cultivos de secano (Boyer, 1982, citado por Satorre *et. al.*, 2003).

En esta zona la napa freática se encuentra próxima a la superficie, afectando el normal desarrollo de los cultivos en forma negativa cuando se encuentra por encima del nivel crítico debido a que impide el desarrollo de raíces y provoca anoxia. Cuando el agua de la napa freática se encuentra por debajo del nivel crítico, al alcance de las raíces del cultivo, y con bajo contenido salino, se espera que la napa sea una fuente de aporte de agua para el cultivo en períodos de déficit hídrico, de esta manera estaríamos frente a una gran ventaja desde el punto de vista productivo, siempre y cuando se cumplan las condiciones antes mencionadas.

Esta fuente, cuando las precipitaciones son deficientes, serían un aporte complementario de agua para el cultivo. Algunos autores destacan la importancia de la napa como una fuente que puede aportar hasta el 100% de los requerimientos hídricos del cultivo (Videla H. 2006).

El balance hídrico para ésta zona explica en gran medida la oscilación de la napa freática (Cisneros *et al.*, 1997). En los últimos 5 años el balance hídrico acumuló un excedente superior a los 700 mm, con lo cual la napa freática sufrió un ascenso neto del orden de los 3 m, y el fenómeno del anegamiento de terrenos tuvo una marcada intensidad.

En épocas de grandes lluvias se denota una importante entrada de sedimentos al sistema de lagunas interconectadas, los cuales no se aprecian a la salida del mismo. Estos al irse depositando en el fondo de las lagunas provocan una disminución de la capacidad de embalse de las mismas, de manera tal que en el mediano plazo aportarán mayores excedentes hídricos aguas abajo que los que aportan actualmente (Chesta, 2004).

El cultivo de maíz desde los años 90 pasó a ocupar un lugar relevante en la producción y comercialización de granos, destacándose ya que ostenta para el pasado decenio los mayores incrementos porcentuales tanto en volúmenes cosechados como en la productividad física media por hectárea (SAGPyA, 2008).

La producción Argentina de maíz que para la campaña 1990/91 totalizaba 7,7 millones de toneladas con 2,2 millones de hectáreas sembradas, mostró un crecimiento constante legando a

producirse para la campaña 1997/98 19,4 millones de toneladas con 3,7 millones de hectáreas sembradas y para la campaña 2006/07 totalizó 21,8 millones de toneladas con 3,6 millones de hectáreas sembradas (SAGPyA, 2008).

En cuanto a los rendimientos medios se han obtenido grandes incrementos ya que para la campaña 1980/81 fue de 3800 kg/ha; para la campaña 1990/91 fue de 4044 kg/ha; para la campaña 1997/98 de 6078 kg/ha, y para la campaña 2006/07 fue de 7665 kg/ha (SAGPyA, 2008).

Este trabajo indagará sobre la influencia de la napa freática en la producción de maíz en ambientes representativos de la Pampa Arenosa Anegable, vinculada a la cuenca baja del Río Popopis (Quinto).

II. ANTECEDENTES

II.1. Fisiología del cultivo de maíz.

El cultivo de maíz (*Zea mays*), de la familia de las gramíneas, es una planta anual de crecimiento primavero-estival. En cuanto a la temperatura, comprende una temperatura base y una temperatura óptima. La temperatura base se ubica en el rango de 6 a 12°C según el genotipo. Siendo generalmente 8°C para los estudiados en Argentina. Un sistema radical denso y profundo le permite a los cultivos acceder a un mayor volumen de agua del suelo, con el cual sostener la demanda transpiratoria y un adecuado estado hídrico por más tiempo. La profundidad de las raíces del cultivo de maíz es de aproximadamente de 1,5 m de profundidad. Los requerimientos de agua para cubrir la demanda transpiratoria durante el ciclo del cultivo varían de 450 a 650 mm. La eficiencia del uso del agua (EUA) es de aproximadamente 3,5 a 4 g de biomasa por kg de agua (Satorre *et. al.*, 2003).

Según Hayward *et. al.* (1953) el maíz es un cultivo medianamente tolerante a las sales, soporta una salinidad de alrededor de 6 mmhos/cm asociada a una disminución de rendimientos del 50%.

La disminución de los rendimientos del cultivo de maíz según Pizarro (1978) son de un 10% con una salinidad de 5 mmhos/cm, 25% con 6 mmhos/cm y 50% con 7 mmhos/cm.

La disminución de los rendimientos para el cultivo de maíz bajo riego debido a la salinidad son de 0% para una salinidad de 1,7 dS/m, 10% para 2,5 dS/m, 25% para 3,8 dS/m y 50% para 5,9 dS/m. (Ayers y Wescot, 1987, citado por Castañón, 2000)

II.2. Importancia de la napa como recurso hídrico y factor desestabilizador

La proximidad de la napa del suelo con la superficie puede constituir una fuente de agua en el perfil para usar por los cultivos y vegetación natural, complementando a las precipitaciones (Cantero *et al.*, 2004).

Si en profundidad se encontrara un potencial mátrico notablemente alto con respecto a las capas suprayacentes de suelo, se generaría un gradiente de potencial mátrico muy alto en la dirección contraria al flujo descendente de la zona de redistribución del agua superficial. Si ese gradiente llega a ser lo suficientemente alto como para superar al gradiente gravitatorio, puede resultar un flujo ascendente hacia las capas superiores. Este flujo ascendente, es lo que usualmente se llama ascenso capilar, y su magnitud depende del gradiente de potencial y de la conductibilidad hidráulica de las capas de suelo que atraviesa (Bernardo, 2005).

Por encima del agua libre o capa freática existe una zona de humedecimiento por el ascenso capilar desde la napa y por la percolación del agua de lluvia, que es capaz de proveer de agua a los cultivos (Cantero *et al.*, 2004).

La efectividad de las capas freáticas como fuente directa de agua para los cultivos según Cantero *et al.* (2004) depende de los siguientes factores.

- Salinidad de la napa: la disponibilidad efectiva de agua de la napa se relaciona con un grado bajo de salinidad, ya que la concentración de sales de la napa gobierna la de la franja capilar suprayacente. Si la salinidad de la napa supera los 10 dS/m se considera poco efectiva como fuente de agua.
- Profundidad de la napa: debe ser tal que permita un ascenso de la franja capilar hasta la zona de crecimiento de las raíces. Por otra parte la napa debe estar por debajo de la profundidad crítica, es decir aquella profundidad que no tenga vinculación con la superficie y por lo tanto no produzca salinización de la misma.
- Profundidad del sistema de raíces: la napa se constituye una fuente en estadios avanzados del cultivo, y para sistemas de raíces profundos.

Algunos autores (Jobágyy *et al.*, 2007) clasifican las napas según sus aportes al cultivo, dividen el perfil de suelo que puede ser ocupado por la napa verticalmente y se pueden reconocer 4 estados distintos en función del nivel. En el estado I (0 a 1.2 m.), predominan los efectos negativos relacionados al anegamiento y la anoxia del sistema radical. En esta fase el descenso de la napa provoca aumentos del rendimiento. En el estado II (1.2 a 2.4 m.), los niveles permiten un buen abastecimiento de agua al cultivo. En este estado el cultivo explora la zona de ascenso capilar ubicada por encima de la napa freática, obteniendo aportes de agua ilimitados sin experimentar anoxia. En el estado III (2,4 a 3,6 m.), los aportes de agua freática comienzan a disminuir con la profundidad, al distanciarse la zona de ascenso capilar del perfil

explorado por la raíces del cultivo. Por último, en el estado IV (por debajo de 3,6 m.) no hay efecto de la napa sobre los cultivos. Las profundidades establecidas son respecto a cultivos anuales estivales en el oeste arenoso de la región pampeana en suelos sin impedancias subsuperficiales y con napas de baja salinidad. Todo esto depende del balance hídrico del sitio y período considerado, de la salinidad del agua de la napa freática, de la textura del suelo, y de la profundidad de raíces del cultivo. Las profundidades antes mencionadas están dadas para una situación particular de los factores antes mencionados.

II.3. Influencia de la napa freática sobre los cultivos en general.

Experiencias en la región para cultivos de soja muestran diferencias de rendimiento importantes, cuando los cultivos alcanzaban la napa, por ejemplo 5000 Kg. en esas condiciones, contra menos de 1200 Kg. en lomas donde el sistema radical quedaba fuera del alcance del ascenso capilar desde la napa (Martini, 2002, citado por Cantero, 2004).

Deben cultivarse especie cuyo sistema de raíces pueda llegar a la napa, y deben eliminarse todo tipo de impedancias mecánicas del perfil del suelo, como por ejemplo pisos de arado. Estos se pueden evitar realizando laboreos profundos que rompan dicha capa densificada en el suelo (Cantero, *et al.*, 2004).

En cultivos de soja en la zona de Laboulaye Videla (2006) señaló que en ambientes con capa freática somera se establece una estrecha relación entre la producción de este cultivo y la capa freática, ya que esta ha contribuido con la necesidad de agua evapotranspirada por el cultivo.

Por otra parte Magliano (2006) en cultivos de soja para la zona de Laboulaye observó mayores rendimientos en la loma, luego en la media loma y los menores rendimientos fueron para la situación de bajo, debido a que en esta última situación el cultivo evidenció problemas de napas cercanas a nivel crítico como sales en superficie, anoxia en las raíces, alto potencial osmótico en el agua del suelo y acumulación temporaria de agua en superficie. Por lo tanto la napa freática constituyó una fuente de agua útil en las situaciones de loma y media loma, y en bajo produjo reducciones significativas de productividad a causa de lo antes mencionado.

Para el cultivo de girasol en la zona de Del Campillo, Sainz (2007) estableció que la napa representó una fuente de agua útil, tanto por ascenso capilar como por contacto directo de las raíces con la napa freática, representado por el comportamiento del cultivo en cuanto a la expansión del área foliar antes que comenzara a normalizarse el régimen pluviométrico normal de la región y por mayores rendimientos en los bajos y laderas bajas que en laderas altas y lomas. Las diferencias de rindes entre niveles freáticos de bajo y loma supera los 2000 kg/ha para este cultivo.

Para cultivos de trigo en el sur de la provincia de Córdoba, Tellería (2005), postula que en el caso de cultivos de secano con napa somera se pueden lograr rendimientos cercanos a los logrados bajo riego, y que en algunos casos son mejores ya que se considera que la napa freática está aportando nutrientes además de agua a los cultivos.

III. HIPÓTESIS:

Para las condiciones a estudiar, la napa freática es una fuente de agua complementaria para el cultivo de maíz cuando ésta se encuentra al alcance de las raíces del cultivo, y no supere el nivel crítico.

IV. OBJETIVOS:

IV.1. Objetivo general:

- Determinar la relación entre la variación de la profundidad y salinidad de la napa freática, y la producción del cultivo de maíz.

IV.2. Objetivos específicos:

- Determinar el ritmo de oscilación de la profundidad de la napa freática en el tiempo y en relación a los factores climáticos
- Evaluar la producción de materia seca en distintos estadios fenológicos y la producción de material cosechable para las diferentes situaciones de los niveles de la napa freática.
- Determinar el nivel crítico de la napa freática para los suelos y el cultivo analizados.
- Elaborar recomendaciones de manejo de las tierras con napa freática somera para el cultivo de maíz.

V. MATERIALES Y MÉTODOS:

V.1. Caracterización del área de estudio.

El área de estudio está comprendida entre 34° 50' 40" de latitud sur y a los 63° 32' 86" de longitud oeste, en la estancia "La Vanguardia", ubicada 15 Km. al sur de la localidad de Buchardo, en el departamento General Roca, al sudeste de la provincia de Córdoba. Estos suelos se encuentran a 128 msnm. Esta área está comprendida dentro de la unidad geomorfológica denominada Pampa Arenosa Anegable Cordobesa.

Los suelos predominantes de esta área son Haplustoles típicos y énticos, y en menor medida suelos intrazonales como Natraculfes y Natralboles típicos.

Los principales factores que actúan sobre la génesis y la productividad de los suelos son la topografía y la profundidad de oscilación de la napa freática.

El clima que comprende el área de estudio es templado, mesotermal, subhúmedo con estación seca y régimen monzónico de precipitaciones. Se encuentra en una zona de transición entre regímenes subhúmedos y semiáridos, con una marcada variabilidad entre períodos de excesos y déficits hídricos.

V.2. Diseño experimental

En una toposecuencia del predio se definirá un diseño experimental de parcelas apareadas, con cuatro tratamientos representados por la oscilación de la napa freática (NF), con tres repeticiones por tratamientos. Los niveles de oscilación de la freática tentativos (dependiendo de las variables climáticas durante el período de desarrollo del cultivo) representan los tratamientos y son:

- Bajo: NF a menos de 1,5 m
- Media loma baja: de 1,5 a 2,2 m
- Media loma alta: de 2,2 a 3 m
- Loma: a más de 3 m.

Esta toposecuencia se establecerá en cultivo de maíz, con sistema de labranza reducida y una distancia entre surcos de 0,7 m.

V.3. Observaciones y mediciones

V.3.1. Suelo:

- Caracterización morfológica, siguiendo las normas de Etchevehere (1976).
- Conductividad eléctrica del extracto saturado hasta 1 m (Richards, 1973) en cinco etapas fenológicas: siembra, V13, R1, R3 y madurez fisiológica (MF).
- Humedad gravimétrica hasta la profundidad de la freática en las etapas mencionadas anteriormente.

V.3.2. Clima:

- Precipitaciones diarias.
- Temperaturas diarias.
- Evapotranspiración potencial según carta de suelos del INTA, hoja Buchardo (INTA, 2000)

V.3.3. Agua subterránea:

- Oscilación de la profundidad del freático con frecuencia quincenal.
- Determinación de la conductividad eléctrica del agua de la freática con frecuencia quincenal.
- La variación del nivel freático se contrastará con modelos de simulación desarrollados por Cisneros et al., (1997), para valorar su grado de ajuste a las condiciones de este ensayo.

V.3.4. Cultivo:

- Densidad de plantas.
- Biomasa en V13, R1, R3 y MF
- Componentes directos del rendimiento:
 - N° de plantas por ha.
 - Peso individual de cariopses.
 - Número de cariopses por m².
- Rendimiento (qq / ha).

Los datos serán analizados mediante el análisis de la varianza (ANOVA) con test de comparaciones múltiples. LSD FISHER $\alpha < 0,05$

V.3.5. Interpretación de los resultados:

- Relaciones entre oscilación de napa y variables climáticas y de suelo, haciéndolos correr en el modelo de simulación de Cisneros et al. 1997.
- Correlaciones de rendimientos con profundidad de napa (función cuadrática o tipo lineal-plana).
 - Relación entre salinidad y profundidad de napa.
 - Relación entre salinidad de suelo y agua de la napa con el rendimiento.
 - Determinación de profundidad crítica de la napa por tipo de suelo y momento de anegamiento.

VI. RESULTADOS

VI.1. Condición climática durante el desarrollo del cultivo.

VI.1.1. Precipitaciones

La media anual de precipitaciones históricas del periodo 1910-2009 (99 años) es de 765 mm. Los promedios anuales han variado de acuerdo a distintos ciclos climáticos, tomando los promedios por década se observa una fluctuación que va de 612 mm (1940-1949) a 901 mm (1980-1989). En la última década 2000-2009 las precipitaciones promedio fueron de 774 mm, caracterizándola como una década promedio.

El valor máximo de precipitaciones registrados fue de 1313 mm en el año 1919 y el mínimo fue de 33 mm en el año 1954, con una amplitud de 1280 mm y un desvío estándar de 223 mm. Esto deja en evidencia la irregularidad del régimen de precipitaciones de la zona.

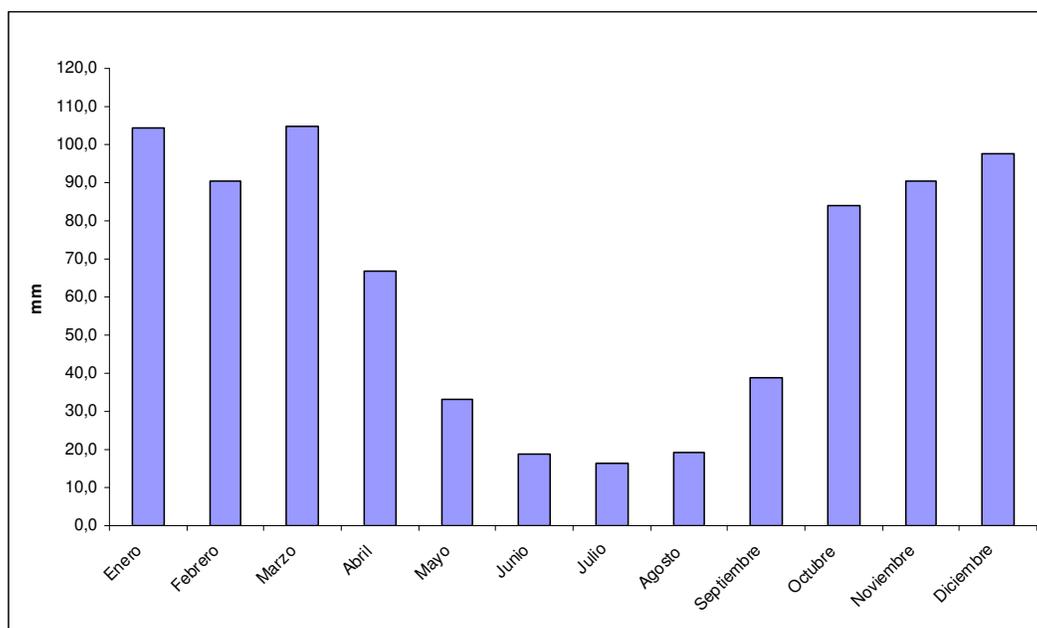


Figura 1: Promedio de precipitaciones mensuales para La Vanguardia, período 1910-2009.

En el año 2008 la precipitación total fue de 640,5 mm con 228,5 mm en el último trimestre y para el año 2009 la precipitación total fue de 723 mm con 215 mm en el primer trimestre. Esto deja en evidencia la falta de precipitaciones en los últimos 3 meses del 2008 y en los primeros 3 meses del 2009, teniendo en cuenta el promedio histórico (1910-2009) da un promedio de 272 mm para el último trimestre del año y un promedio de 299,6 mm para el primer trimestre del año.

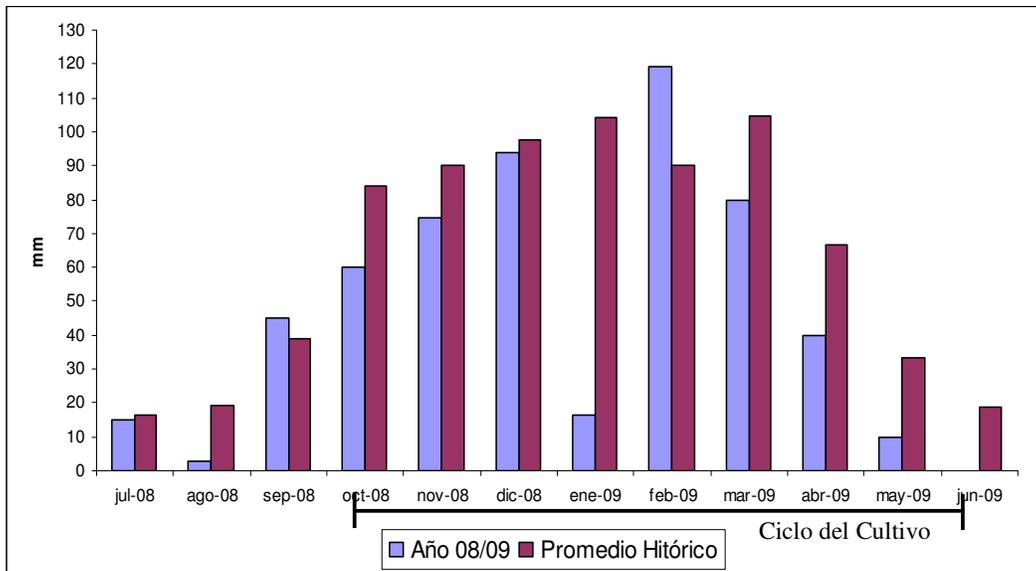


Figura 2: Precipitaciones para el ciclo del cultivo comparadas con las precipitaciones medias históricas.

Como se puede ver en la figura 2 las precipitaciones totales para el ciclo del cultivo (octubre-mayo) fueron por debajo de la media histórica, sumando 494 mm con una baja cantidad de precipitaciones en el mes de enero (16 mm), la media histórica de precipitaciones para los meses que comprenden de octubre a mayo suman 672 mm y la media para el mes de enero es de 104 mm. Esta falta de precipitaciones en el mes de enero es coincidente con la mayor demanda de agua por parte del cultivo ya que en ese momento se encuentra el periodo crítico que comprende desde V13 hasta R3; y es coincidente con la mayor demanda de agua por parte de la atmósfera debido a las altas temperaturas; motivo por el cual el cultivo se vio tan afectado en sus rendimientos (discutido luego en el apartado de rendimientos).

VI.1.2. Balance hidrológico.

El balance hidrológico para la zona de Bucharcho (INTA, 2000) muestra un desequilibrio hídrico negativo entre la demanda de agua (ETP) y los aportes del suelo y la precipitación (153,5 mm de déficit anual). Los meses de mayor déficit son diciembre (50,5 mm) y enero (58,9 mm) y en menor grado febrero (31 mm) y noviembre (13,1 mm). El período de recarga del suelo se extiende desde marzo hasta octubre. No hay excesos de agua en el suelo durante el año.

Tabla 1: Balance hidrológico para la zona de Buchardo. (mm)

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Año
ETP	166,7	123,3	90,7	53,2	27,3	13,8	14,1	23	40,8	73,3	112,1	155,2	893,5
Precipitación	94	88	104	57	36	22	23	23	48	82	85	78	740
Almacenaje	17,4	13,2	26,4	30,2	38,9	47,1	56	56	63,2	71,9	57,9	31,2	
ETR	107,8	92,3	90,7	53,2	27,3	13,8	14,1	23	40,8	73,3	99	104,7	740
Exceso Hídrico	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Déficit Hídrico	58,9	31	0	0	0	0	0	0	0	0	13,1	50,5	153,5

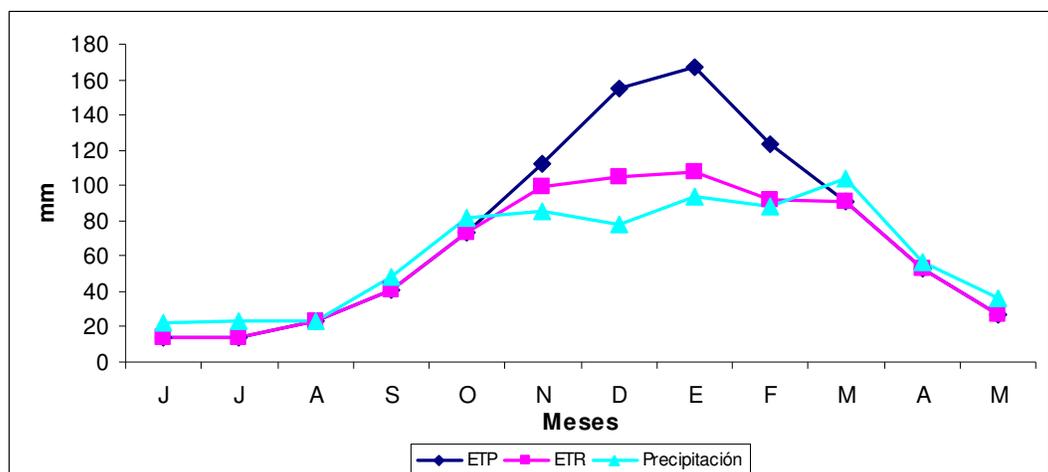


Figura 3: Balance hidrológico mensual para Buchardo.

VI.1.3. Temperaturas

Según datos de la Carta de Suelos del INTA (2000) Hoja Buchardo, para el área la temperatura media anual es de 16,7 °C, una media máxima de 24,9 °C y una media mínima de 9,0 °C, con una amplitud térmica media de 15,9 °C. Las temperaturas máximas y mínimas absolutas son de 44,2 °C y 11,5 °C respectivamente.

Tabla 2: Temperaturas para la zona de Buchardo. (mm)

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Año
T° Media	25,0	23,6	20,2	16,6	12,3	9,0	8,6	10,3	13,4	16,9	20,6	23,6	16,7
T° Máx Media	33,8	32,6	28,7	24,8	19,8	16,7	16,7	18,5	21,3	24,6	29,0	32,2	24,9
T° Máx Abs.	44,0	44,1	40,2	36,3	34,2	28,8	29,7	35,4	37,8	39,5	41,5	44,2	44,2
T° Mín Media	16,4	15,2	12,8	9,0	6,0	2,6	1,8	2,8	5,6	8,9	12,2	15,0	9,0
T° Mín Abs.	1,8	4,1	0,4	-6,0	-4,8	-8,7	-11,5	-9,6	-5,8	-3,0	0,6	2,8	-11,5

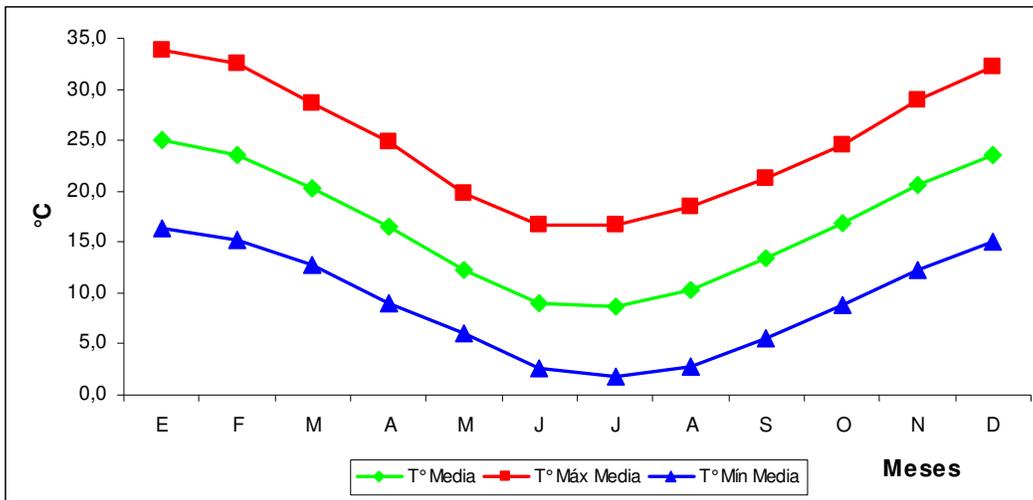


Figura 4: Temperaturas medias, máximas medias y mínimas medias para el área según Carta de Suelos del INTA, Hoja Buchardo año 2000.

En base a los valores de temperatura, se pueden definir 4 estaciones térmicas:

- Verano térmico: para la región se extiende desde principio de Noviembre hasta principio de Marzo.

- Estación intermedia sin heladas: Se extiende desde principios a fin de Octubre y la primera quincena de Marzo.

- Estación intermedia con heladas: Va desde principio de Agosto a principio de Octubre y desde mediado de Marzo a fin de Mayo.

- Invierno térmico: Se extiende desde mediado de Mayo a fin de Julio.

Durante el ciclo del cultivo la temperatura media de octubre en que se realizó la siembra hasta junio que se cosechó fue de 19,7 °c, la media máxima fue de 37,3 °c y la mínima de 4,5 °c para el mismo periodo. Durante los meses de diciembre, enero y febrero cuando los requerimientos del cultivo son los mas altos y durante el cual las precipitaciones fueron escasas la temperatura media fue de 23,3 °c, la media máxima fue de 41,1 °c y la media mínima fue de 10 °c (Figura 5), habiendo en este período muy altas temperaturas por los que la demanda atmosférica de agua fue también muy alta y combinado con periodos de mucho viento.

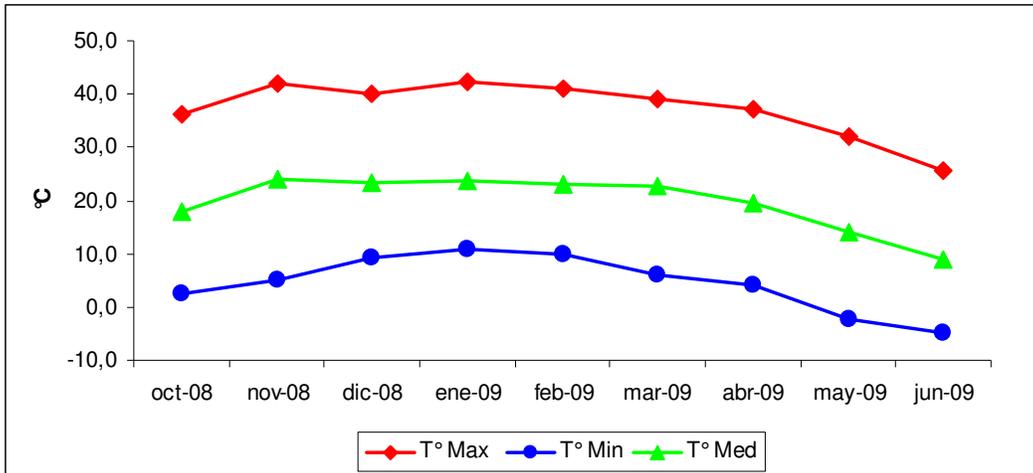


Figura 5: Temperaturas medias, máximas y mínimas durante el periodo del cultivo de octubre del 2008 a junio del 2009.

VI.2. Descripción de suelos.

VI.2.1. Suelos del Bajo.

Los suelos analizados corresponden a variantes de la serie Pincén (INTA, 2000) el cual es un suelo imperfecta a moderadamente bien drenado, con fuerte alcalinidad sódica a partir de los 40 cm de profundidad y se encuentra vinculado a las hoyas medanosas o concavidades dentro de lomas arenosas y a planos deprimidos. Se han desarrollado a partir de materiales franco arenosos.

Estos suelos presentan limitaciones para los cultivos de raíces profundas, ya que la presencia de alcalinidad sódica a partir de los 40 cm aproximadamente impide el desarrollo normal de las raíces.

Este suelo es similar a un Haplacuel thapto nátrico, formado por una capa de material franco arenoso moderno, depositado sobre un material más franco sódico, de mayor antigüedad, con la siguiente secuencia de horizontes.

- **A1:** 0-17 cm. Franco arenosa; estructura en bloques subangulares medios moderados; friable en húmedo; no plástico; no adhesivo; limite inferior claro, suave.
- **AC:** 17-42 cm. Franco arenosa; estructura masiva; friable en húmedo, no plástico; no adhesivo; límite inferior abrupto, suave.

- **II B2tna:** 42-64 cm. Franca a franco arcillo limosa; estructura en prismas y bloques subangulares medios moderados; friable en húmedo; ligeramente plástico; ligeramente adhesivo; barnices húmicos comunes, medios; moteados comunes, medios, precisos; escasas concreciones calcáreas medias; límite inferior claro, suave.
- **II B3:** 64-94 cm. Franco arenosa; estructura en bloques subangulares medios, débiles; muy friable en húmedo; no plástico; no adhesivo; vestigios de barnices; moteados comunes, medios débiles; escasas concreciones calcáreas finas; límite inferior abrupto.
- **II Cca:** 94 cm a +. Franco arenosa; estructura masiva, muy friable en húmedo; no plástico; no adhesivo; abundante calcáreo pulverulento en la masa del suelo.

Tabla 3: datos analíticos Serie Pincén

HORIZONTE	A1	AC	IIB2tna	IIB3	IICca	
Profundidad de la muestra (cm)	0-17	17-42	42-64	64-94	94 a +	
Materia Orgánica (%)	1,75	0,43				
Carbono Orgánico (%)	1,02	0,25	0,13	0,08		
Nitrógeno Total (%)	0,105	0,040	0,037			
Relación C/N	9,7	6,2	3,5			
Arcilla, 2 u (%)	9,2	6,0	18,4	11,6	9,4	
Limo, 2-50 u (%)	35,2	29,6	24,6	26,9	26,7	
Arena Muy fina, 50-100 u (%)	26,0	28,3	35,9	34,1	35,4	
Arena Fina, 100-250 u (%)	21,1	27,5	13,8	21,0	20,8	
Arena Media, 250-500 u (%)	3,0	3,8	3,0	2,8	3,1	
Arena Gruesa, 500-1000 u (%)	4,2	5,2	3,1	2,6	3,0	
Arena Muy Gruesa, 1-2 mm (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Calcáreo, CaCO ₃ (%)	0,0	0,0	0,69	0,36	2,18	
Equivalente de Humedad (%)	15,2	9,8	21,6	16,7	16,5	
pH en Pasta	5,6	6,5	8,4	9,0	9,1	
pH en agua 1:2,5	5,9	6,8	9,0	9,3	9,6	
Cationes de intercambio (me/100 gr):	Ca ⁺⁺	4,9	3,1			
	Mg ⁺⁺	0,3	0,6			
	Na ⁺	0,2	0,4	5,8	5,9	6,1
	K ⁺	2,4	1,6	2,7	2,0	1,7
	H ⁺	1,8	0,6			
Na+, del Valor T			38,92	45,73	61,00	
Suma de bases, me/100 gr (T)	7,8	5,7				
CIC me/100 gr (T)	9,8	6,7	14,9	12,0	10,0	
Sustitución con Bases, % (S/T)	79	85				

VI.2.2. Suelos de la Media Loma Baja, Media Loma Alta y Loma.

Los suelos analizados corresponden a la serie Buchardo (INTA, 2000), el cual es un suelo bien drenado, desarrollado sobre materiales franco arenosos finos, vinculados a lomadas casi planas muy ligeramente onduladas.

Los suelos de la serie Buchardo presentan mayor retención de humedad y mejor estructura superficial con respecto a los demás suelos de lomadas del área, siendo su uso eminentemente agrícola, aunque se encuentran ligeramente limitados por condiciones climáticas.

Este suelo está taxonómicamente denominado Haplustol údico de textura franca gruesa con la siguiente secuencia de horizontes:

- **A1:** 0-23 cm. Franca; estructura en bloques subangulares medios moderados; duro en seco; friable en húmedo; ligeramente plástico; ligeramente adhesivo; límite inferior claro, suave.
- **B2:** 23-45 cm. Franca, estructura en prismas irregulares moderados y bloques subangulares medios moderados; friable en húmedo; ligeramente plástico; ligeramente adhesivo; escasos barnices (“Clay Skins”) finos; límite inferior gradual.
- **B3:** 45-68 cm. Franca a franco arenosa; estructura en bloques subangulares medios débiles; friable en húmedo; no plástico; no adhesivo; límite inferior gradual.
- **C:** 68 cm a +. Franco arenosa; estructura masiva; friable en húmedo; no plástico; no adhesivo.

Tabla 4: datos analíticos Serie Buchardo.

HORIZONTE	A1	B2	B3	C	
Profundidad de la muestra (cm)	0-23	23-45	45-68	68 a +	
Materia Orgánica (%)	1,96	0,89			
Carbono Orgánico (%)	1,14	0,52	0,25		
Nitrógeno Total (%)	0,124	0,078			
Relación C/N	9,2	6,7			
Arcilla, 2 u (%)	16,5	16,7	13,3	11,2	
Limo, 2-50 u (%)	34,7	34,9	33,3	34,2	
Arena Muy fina, 50-100 u (%)	24,0	22,4	24,2	25,3	
Arena Fina, 100-250 u (%)	24,0	25,7	26,6	27,3	
Arena Media, 250-500 u (%)	1,1	0,8	0,8	0,7	
Arena Gruesa, 500-1000 u (%)	0,4	0,8	0,9	0,8	
Arena Muy Gruesa, 1-2 mm (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	
Calcáreo, CaCO ₃ (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	
pH en Pasta	5,6	6,3	6,6	7,0	
pH en agua 1:2,5	6,0	6,6	6,7	7,2	
Cationes de intercambio (me/100 gr):	Ca ⁺⁺	7,1	8,5	9,4	9,1
	Mg ⁺⁺	1,3	1,1	0,7	0,8
	Na ⁺	0,2	0,2	0,2	0,1
	K ⁺	2,4	1,6	1,0	0,8
	H ⁺	2,0	1,2	0,7	0,6
Suma de bases, me/100 gr (T)	11,0	11,4	11,3	10,8	
CIC me/100 gr (T)	13,0	12,8	12,0	11,4	
Sustitución con Bases, % (S/T)	85	89	94	95	

VI.3. Dinámica de la napa freática.

VI.3.1. Profundidad de la napa freática.

Los datos de profundidad del nivel freático fueron tomados aproximadamente cada 15 días con 4 freatómetros ubicados en diferentes áreas. El freatómetro 1 ubicado en el bajo, el freatómetro 2 en la media loma baja, el freatómetro 3 en la media loma alta y el freatómetro 4 en la loma. En estos se midió la profundidad de la napa en centímetros y se obtuvieron muestras de agua para medir la conductividad eléctrica (dS/m) del agua de la napa para cada freatómetro.

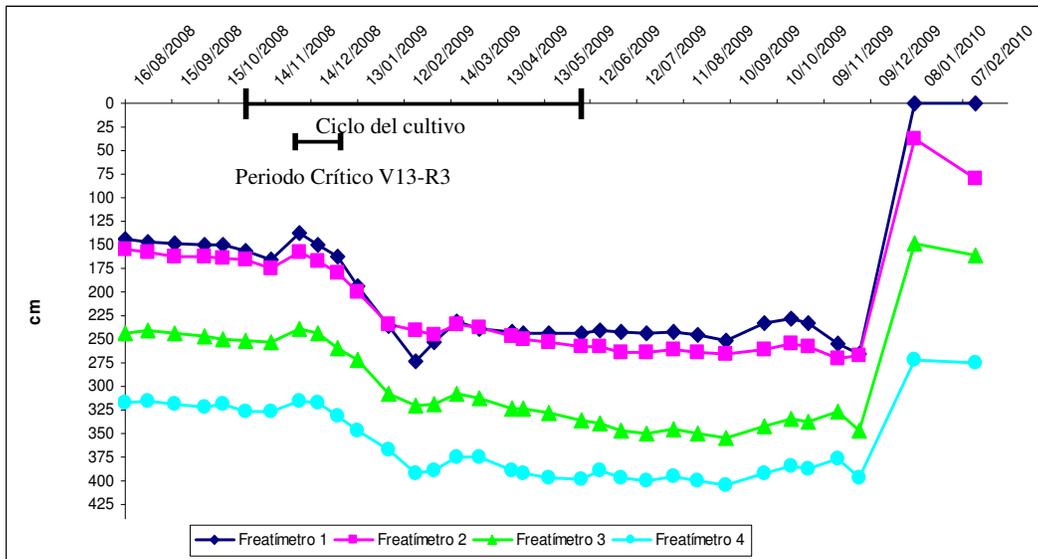


Figura 6: Profundidad de la napa durante el periodo de estudio de la misma para cada frea'tímetro correspondiente a cada ambiente.

La napa para el comienzo del seguimiento de la misma se mantuvo con poca variación hasta mediados del mes de diciembre, a partir de este momento de más requerimiento de agua por parte del cultivo y la atmosfera, altas temperaturas y vientos la napa se fue profundizando constantemente hasta fines de mayo donde se mantuvo a constante a mayor profundidad; a partir de principios de diciembre del 2009 con el mayor aporte de agua por las precipitaciones hubo un gran aumento del nivel freático de aproximadamente unos 150 a 200 cm para comienzo de enero del 2010, el bajo luego de las mencionadas precipitaciones quedó anegado con aproximadamente unos 20 cm de agua por encima de la superficie del suelo (Figura 6).

Durante el ciclo del cultivo se estima que hubo aportes por parte de la napa freática en las áreas correspondientes a los frea'tímetros 1 (bajo) y 2 (media loma baja) ya que la napa se encontró a una profundidad promedio de 207 y 213 cm de profundidad para el bajo y la media loma baja respectivamente, un menor aporte y casi nulo en el frea'tímetro 3 (media loma alta) con una profundidad promedio de 290 cm y nulo aporte en el frea'tímetro 4 (loma) a una profundidad promedio de 360 cm; según la clasificación del aporte de las napas por Jobágyy *et al.*, 2007. Estos comentarios se amplían al tratar la producción del cultivo.

El área correspondiente al bajo, luego de una lluvia a fines de noviembre estuvo anegada, lo que causo la muerte de las plantas por anoxia en gran parte del área como se ve en la Figura 7. Una de las causas de este anegamiento podría ser por la formación de una napa colgada debido a la baja infiltración del suelo para el agua proveniente de la misma lluvia y del escurrimiento de las áreas más elevadas. Esta es la causa por la cual a pesar del aporte de la

napa freática al cual nos hemos referido los rendimientos en el bajo fueron menores a los esperados.

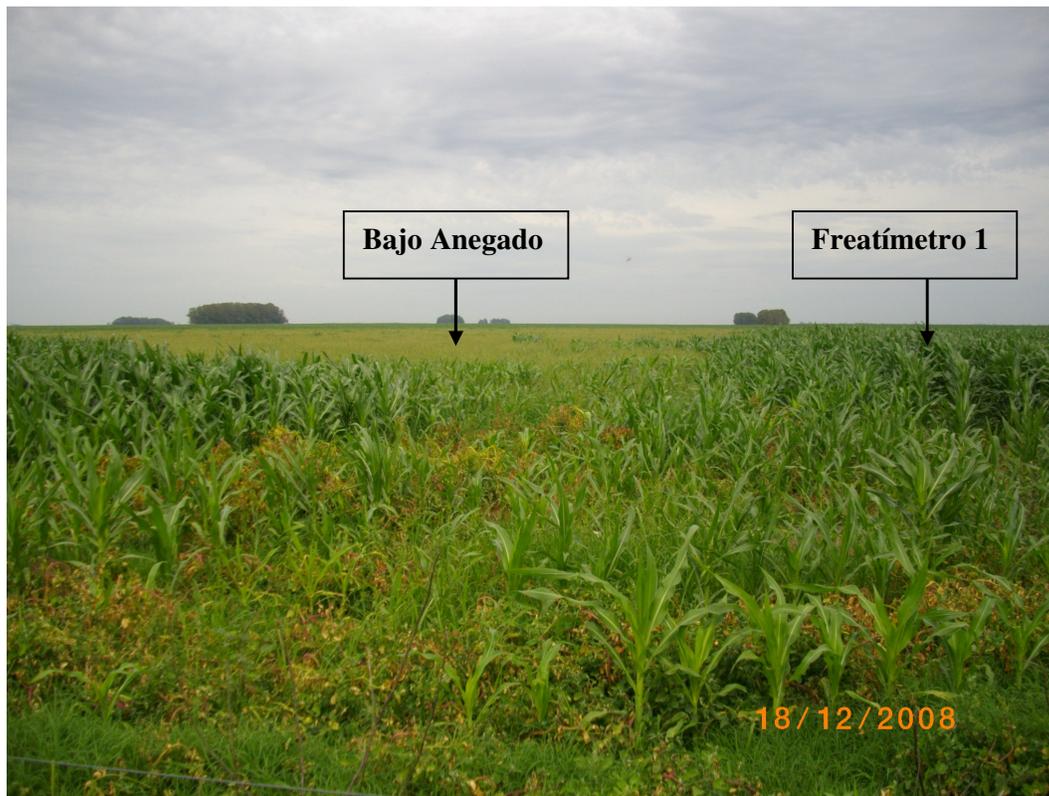


Figura 7: Vista general del bajo que quedó anegado después de la lluvia.

En cuanto a la profundidad crítica se podría indicar que se encuentra cuando la napa se encuentra por encima de los 120 cm de profundidad ya que ante periodos de altas precipitaciones la napa puede ascender y quitar espacio para el oxígeno produciendo periodos de anoxia para las raíces causando la pérdida de plantas y el descenso de rendimiento. También se pudo observar la presencia de una capa densificada, probablemente genética en el suelo del bajo, determinando así un impedimento para la infiltración del agua de lluvia y creando en momentos una napa colgada por encima de dicha capa.

Para la determinación de los diferentes ambientes se utilizó un nivel de anteojo para obtener las cotas del terreno, así con las cotas del terreno y restándoles la profundidad de la napa se obtuvieron las cotas de la napa. Con las cotas de la napa se pudo ver la pendiente de la misma para saber en que dirección se mueve el agua de la napa. La cota terreno se tomo del general del área de 130 msnm.

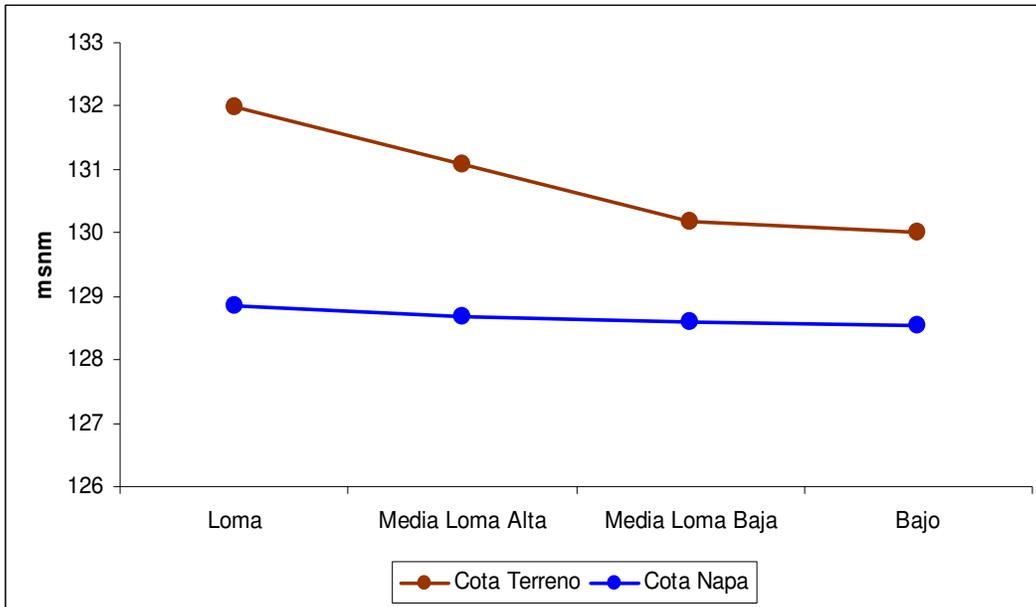


Figura 8: Cota del terreno y cota de la napa.

La napa para el área en estudio donde se colocaron los freáticos tiene pendiente que va desde la loma hacia el bajo. Geográficamente la dirección de la napa sería de oeste a este como se puede ver a continuación en la figura 9.



Figura 9: Ubicación geográfica de los freáticos y representación de la pendiente estimada de la napa.

VI.3.2. Salinidad del agua de la napa freática (C.E.)

La conductividad eléctrica del agua de la napa presentó un comportamiento homogéneo durante el ciclo del cultivo siendo de valores más bajos en el bajo y aumentando hacia la loma. Observándose en ésta última valores muy superiores a las otras áreas en estudio y con mayor variación de los valores de conductividad eléctrica.

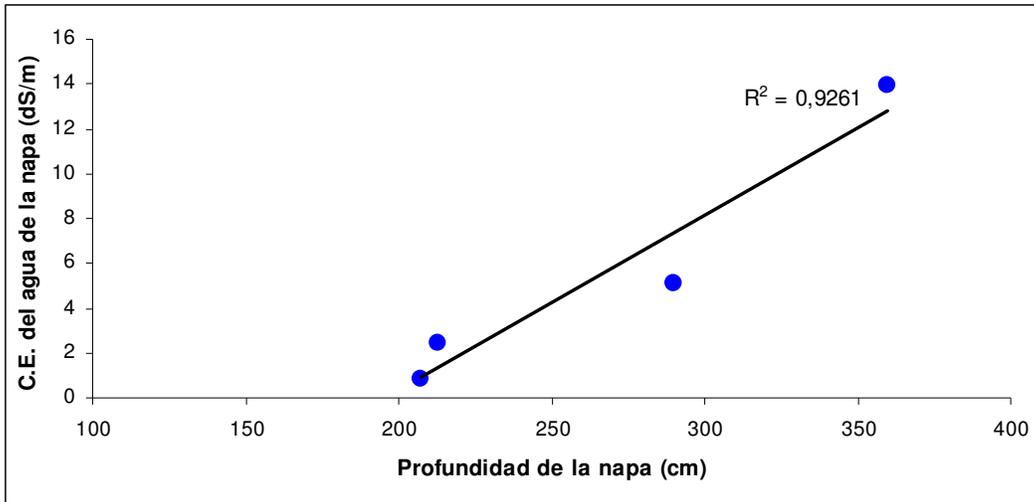


Figura 10: relación entre la profundidad promedio de la napa y la C.E. promedio de la misma.

Se puede observar que hay relación estrecha entre la profundidad promedio de la napa y la C.E. promedio de la misma, de manera que a mayor profundidad de la napa mayor es la C.E. del agua debido al mayor contenido de sales. Estos valores fueron obtenidos del promedio de los valores observados durante el ciclo del cultivo. Estas variaciones en salinidad de la napa pueden deberse a la existencia de recargas locales, para las menores C.E., y napas regionales, para las mayores C.E. (Cisneros et al., 2006).

Tabla 5: Conductividad eléctrica en dS/m del agua de la napa para el ciclo del cultivo de maíz. Datos tomados con frecuencia quincenal aproximadamente.

Fecha	B	MLB	MLA	L
18/10/2008	1,87	2,96	5,31	14,160
02/11/2008	1,662	2,766	5,14	14,740
18/11/2008	1,548	2,682	5,25	14,970
06/12/2008	0,58	2,302	5,08	15,500
18/12/2008	0,541	2,49	5,01	16,020
31/12/2008	0,537	2,46	5,1	15,870
13/01/2009	0,577	2,51	5,13	16,000
02/02/2009	0,612	2,616	5,17	10,250
19/02/2009	0,72	2,425	4,73	
03/03/2009	0,785	2,345	4,88	11,700
18/03/2009	0,566	2,03	5,15	12,220
01/04/2009	0,7	2,333	5,34	12,850
22/04/2009	0,652	2,606	5,32	13,180
30/04/2009	0,819	2,34	5,33	
16/05/2009	0,66	2,31	5,2	
06/06/2009	0,678	2,34		

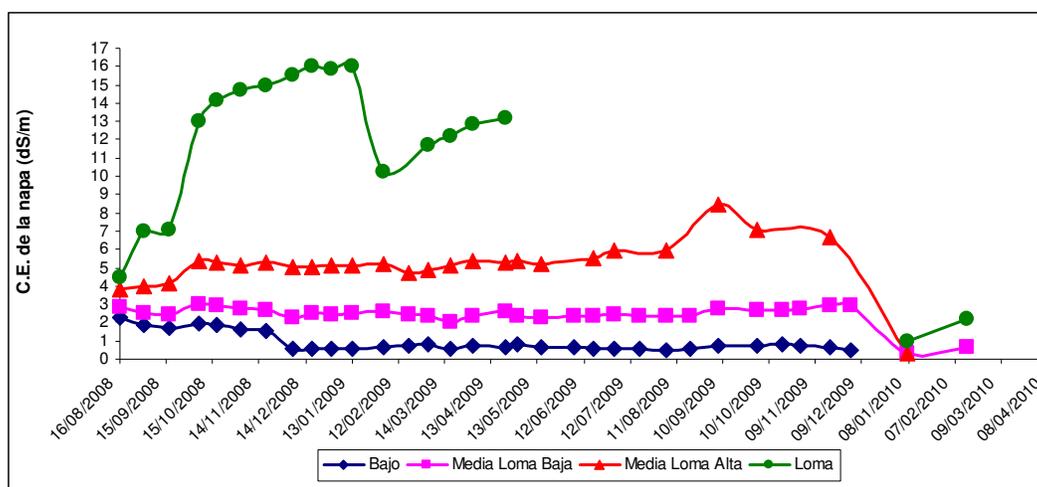


Figura 11: C.E. del agua de la napa para cada ambiente durante el periodo de seguimiento de la napa.

El comportamiento de la misma a lo largo del período de estudio fue variable para cada situación, como se puede observar en la Figura 11 en el bajo es notable un descenso de la salinidad en el comienzo del periodo de estudio y luego se estabilizo, a partir de aproximadamente el 10/11/2008, por debajo de 1 dS/m. Para el caso de la media loma baja la C.E. se mantuvo constante durante la mayoría del período de estudio hasta enero del 2010 donde hubo un notable descenso de la misma debido al aporte de agua por altas precipitaciones que se dieron en los meses previos, esto mismo provocó también el descenso de la C.E. en la media loma alta y en la loma (Figura 11). También se puede observar que en la media loma alta hubo un aumento constante de la C.E. del agua de la napa desde que comenzó el seguimiento de la misma hasta el comienzo de las precipitaciones en diciembre del 2009. La loma mostró un comportamiento dispar en relación al resto de los ambientes, con un gran aumento de la C.E. en el comienzo del seguimiento, luego un descenso muy notable, casi coincidente con la fecha del descenso de la C.E. observada en el bajo, con el seguido ascenso. Luego hubo un período donde la napa descendió y no se pudo obtener la muestra de agua de la napa hasta el ascenso de la misma en enero del 2010 donde la C.E. fue muy inferior a lo observado hasta el momento.

VI.3.3. Ajuste del nivel freático a modelos de predicción.

Con los datos obtenidos de las mediciones de la profundidad de la napa observados, las precipitaciones para el ciclo de estudio y con los datos de evapotranspiración históricos obtenidos de la Carta de Suelos del INTA (2000) hoja Buchardo, se compararon las profundidades observadas de la napa con las profundidades simuladas con un modelo de predicción de la dinámica de la napa (Cisneros, 1994).

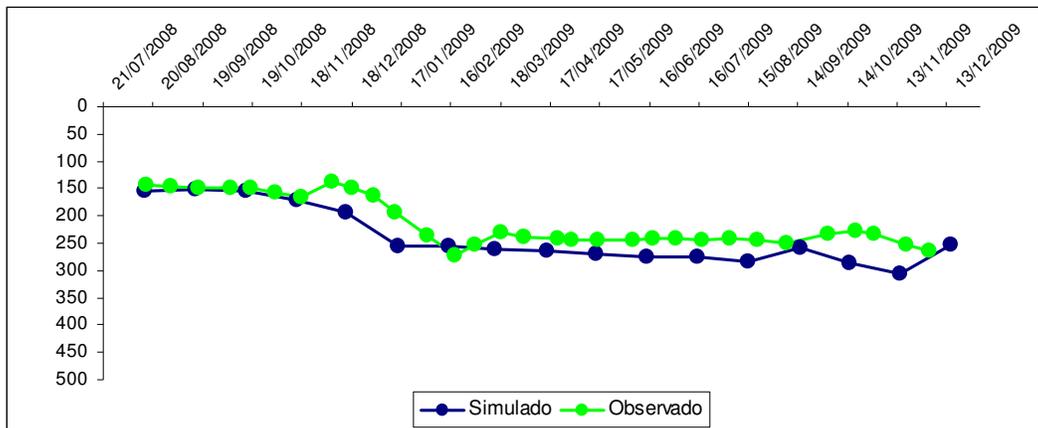


Figura 12: Comparación de profundidad de la napa observada y simulada con el modelo de predicción para la zona del Bajo.

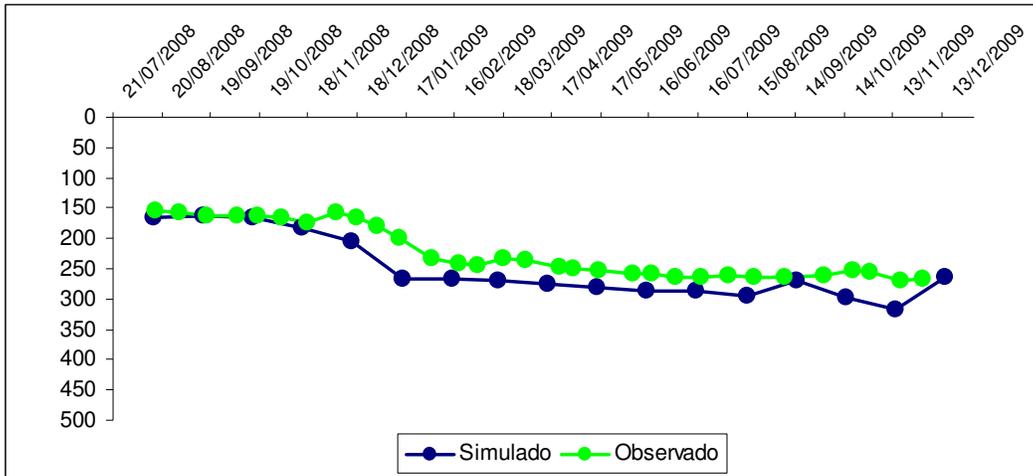


Figura 13: Comparación de profundidad de la napa observada y simulada con el modelo de predicción para la zona de la Media Loma Baja.

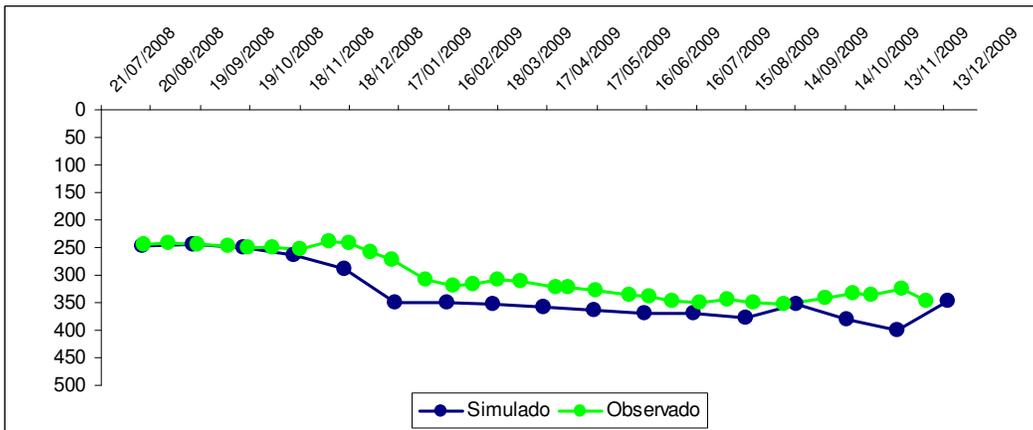


Figura 14: Comparación de profundidad de la napa observada y simulada con el modelo de predicción para la zona de la Media Loma Alta.

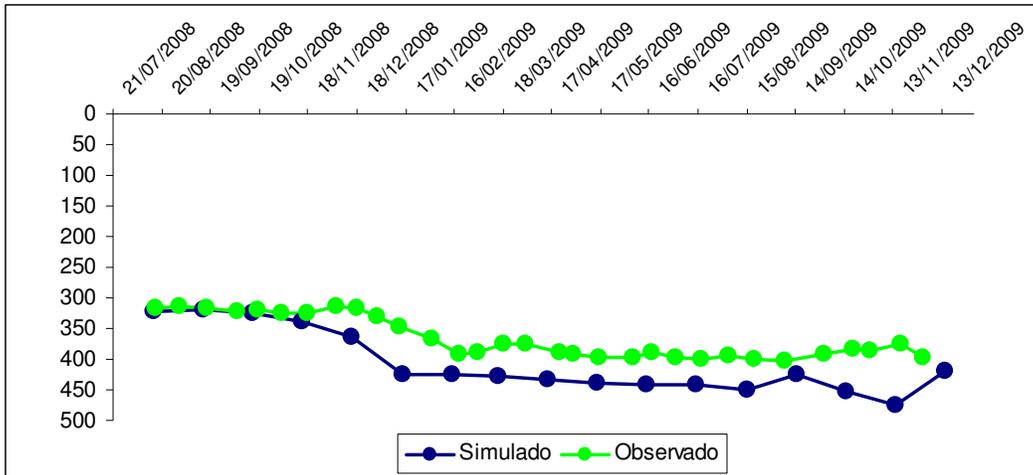


Figura 15: Comparación de profundidad de la napa observada y simulada con el modelo de predicción para la zona de la Loma.

Los resultados observados en las figuras 12, 13, 14 y 15 dejan en evidencia que la profundidad de la napa para la situación simulada tiende a ser levemente mas sensible en cuanto a la variación de profundidad para los cuatro ambientes en estudio y además tiene una pequeña diferencia mostrando un poco mas de profundidad promedio. Esta diferencia puede ser debido a que una de las variables para la simulación de la profundidad de la napa es la evapotranspiración potencial (ETP) y los datos promedios de ETP utilizados para la simulación puede que sean mayores que la ETR (Evapotranspiración Real), esto puede deberse a condiciones propias del ambiente como el suelo, la cobertura y las temperaturas para el año en estudio.

La profundidad media real para el Bajo fue de 212 cm y la media simulada de 239 cm con una diferencia de 27 cm; la profundidad media real para la Media Loma Baja fue de 223 cm y la media simulada de 250 cm con una diferencia de 27 cm al igual que en el Bajo; la profundidad media real para la Media Loma Alta fue de 303 cm y la media simulada de 303 cm con una diferencia de 31 cm y la profundidad media real para la Loma fue de 366 cm y la media simulada fue de 407 cm con una diferencia de 42 cm. Como se observa en las figuras 12, 13, 14 y 15 la diferencia es similar para las cuatro situaciones, con un leve aumento de dicha diferencia para la Media Loma Baja y para la Loma.

Tabla 6: ecuaciones y R² de la relación entre los valores de profundidad de la napa observados y simulados con el modelo de predicción para cada ambiente.

Ambiente	NF medio observado	NF medio simulado	R²
Bajo	212	239	83%
Media Loma Baja	223	250	86%
Media Loma Alta	303	333	79%
Loma	366	407	80%

Como de puede ver en la tabla 6, el modelo ajusta mejor para el ambiente del bajo y la media loma baja con un R² de 83 y 86% respectivamente. Para los ambientes de media loma alta y loma el modelo tiene un R² de 79 y 80 % respectivamente. El modelo de predicción tiene una buena relación con la profundidad de la napa observada para los ambientes analizados, con lo que se puede estimar la profundidad de la napa con los datos de precipitaciones y evapotranspiración de la zona.

VI.4. Dinámica de la humedad, salinidad y pH del suelo.

VI.4.1. Humedad gravimétrica del suelo.

La humedad gravimétrica del suelo fue analizada hasta los 120 cm en 5 oportunidades; en presiembra, siembra, V13, R1 y MF. La muestra de suelo de presiembra fue obtenido el 16/08/08 para tener un dato más y poder analizar la evolución del contenido de humedad previamente a la siembra, la muestra de suelo para obtener el dato de humedad a la siembra se obtuvo el 25/10/08, para V13 el 19/12/08, para R1 el 02/01/09 y para MF el 01/05/09.

Las muestras se tomaron próximas a la ubicación del freatómetro cada 20 cm de profundidad hasta llegar a los 120 cm, esas muestras luego fueron pesadas y puestas en estufa a 105°C durante 3 días, al tercer día se volvieron a pesar y así se obtuvo el porcentaje de humedad gravimétrica para cada muestra.

Los datos obtenidos para cada unidad topográfica fueron los siguientes:

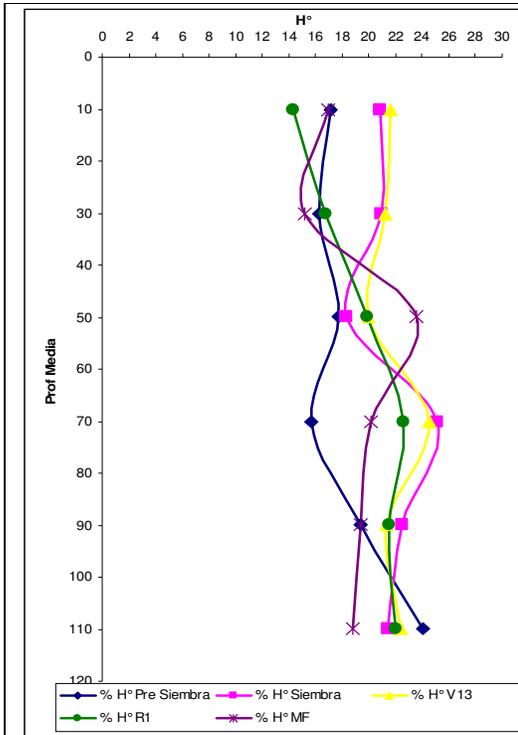


Figura 16: % de humedad gravimétrica para los diferentes estadios en el Bajo. Napa freática promedio a 207 cm de profundidad. Máx. 273 cm y mín. 137 cm.

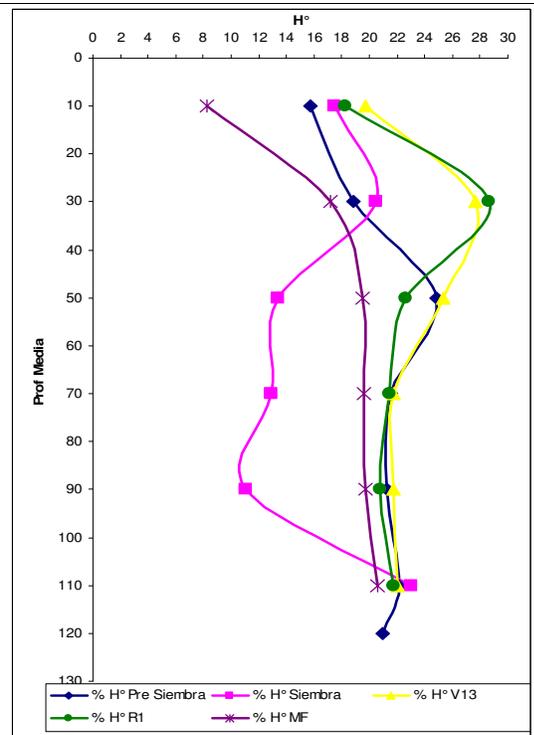


Figura 17: % de humedad gravimétrica para los diferentes estadios en la Media Loma Baja. Napa freática promedio a 213 cm de profundidad. Máx. 258 cm y mín. 158 cm.

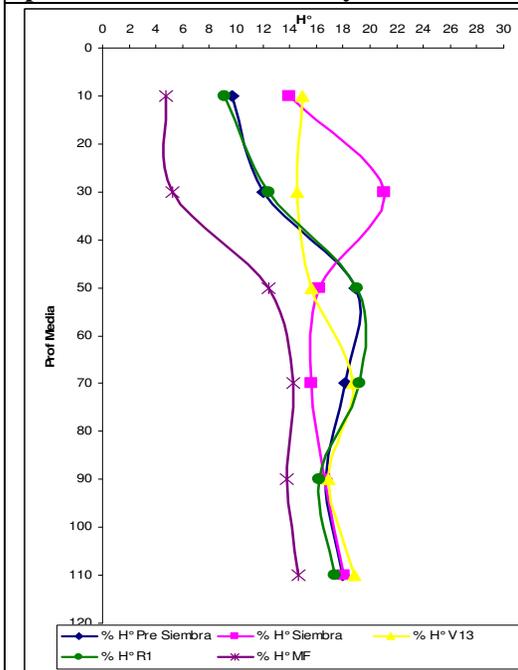


Figura 18: % de humedad gravimétrica para los diferentes estadios en la Media Loma Alta. Napa promedio a 290 cm de profundidad. Máx. 336 cm y mín. 238 cm.

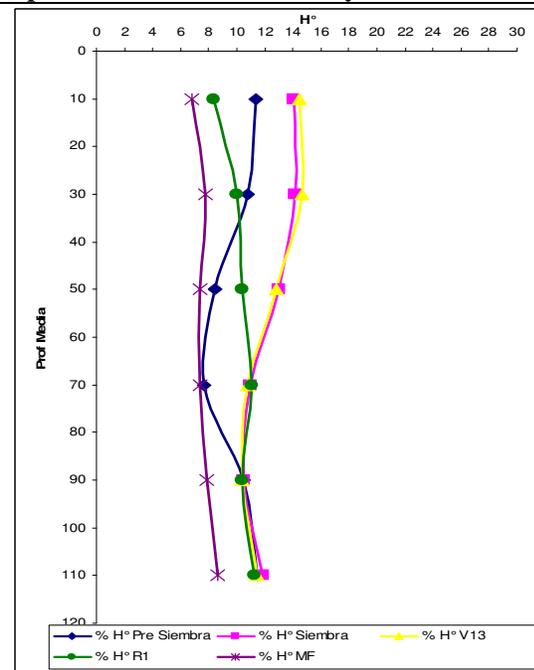


Figura 19: % de humedad gravimétrica para los diferentes estadios en la Loma. Napa freática promedio a 360 cm de profundidad. Máx. 398 cm y mín. 315 cm.

Como se puede observar en los gráficos la humedad gravimétrica del suelo tendió a ser menor a medida que avanzó el tiempo y así el desarrollo del cultivo, debido a que entre las etapas de desarrollo V13 a R3 cuando se presenta el periodo crítico del cultivo en cuanto a los requerimientos de humedad el clima se presentó seco, de pocas precipitaciones y condiciones de altas temperaturas y mucho viento, lo que aumentó la demanda de agua por parte de la atmósfera y así aumentó la evapotranspiración para cubrir esa demanda; esto se vio reflejado en los bajos rendimientos del cultivo a cosecha debido al déficit de agua provocado por dichas condiciones.

VI.4.2. Salinidad del suelo.

A continuación se muestran las salinidades ajustadas a valores de extracto de saturación, a distintas profundidades, 0-20; 40-60 y 80-100 cm; en presiembra, siembra y 3 etapas fenológicas del cultivo (V13, R1 y R3); con nivel freático para el ciclo del cultivo de maíz desde la siembra el 18/10/08 hasta la cosecha el 03/06/09 fluctuando alrededor de los 207 cm en el bajo, 213 cm en la media loma baja, 290 cm en la media loma alta y 360 cm en la loma.

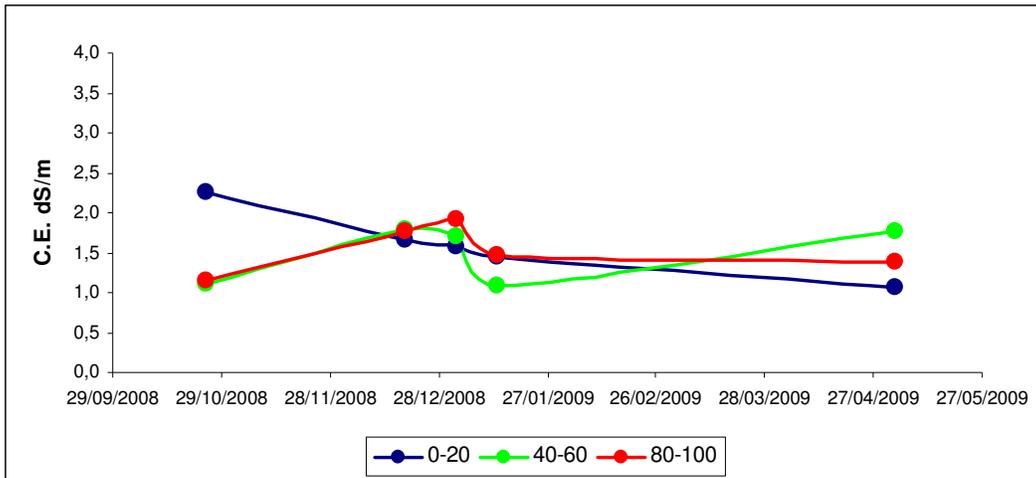


Figura 20: C.E. del extracto saturado para el ambiente del bajo.

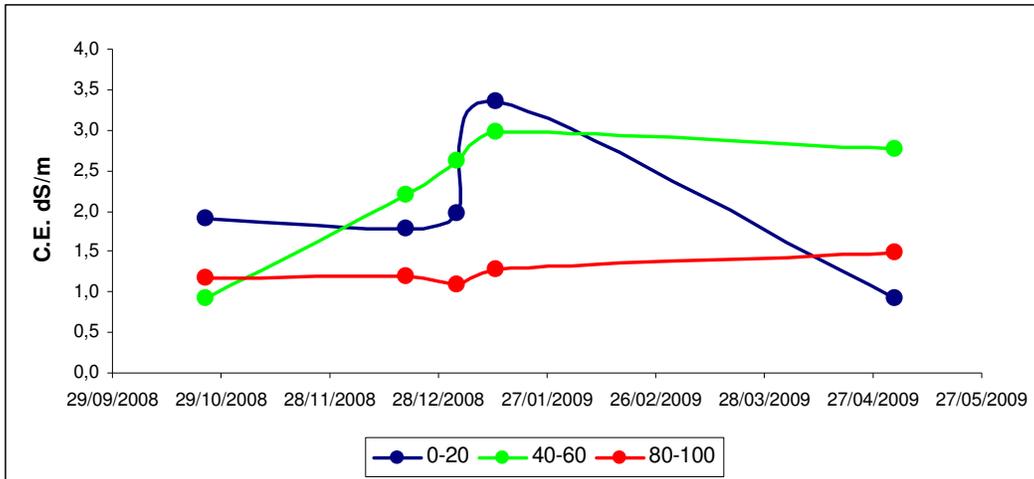


Figura 21: C.E. del extracto saturado para el ambiente de la media loma baja.

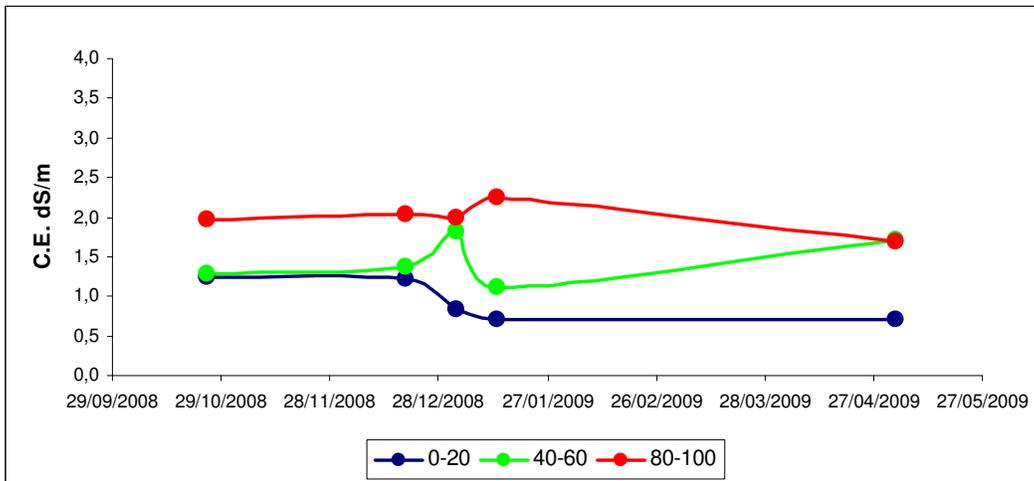


Figura 22: C.E. del extracto saturado para el ambiente de la media loma alta.

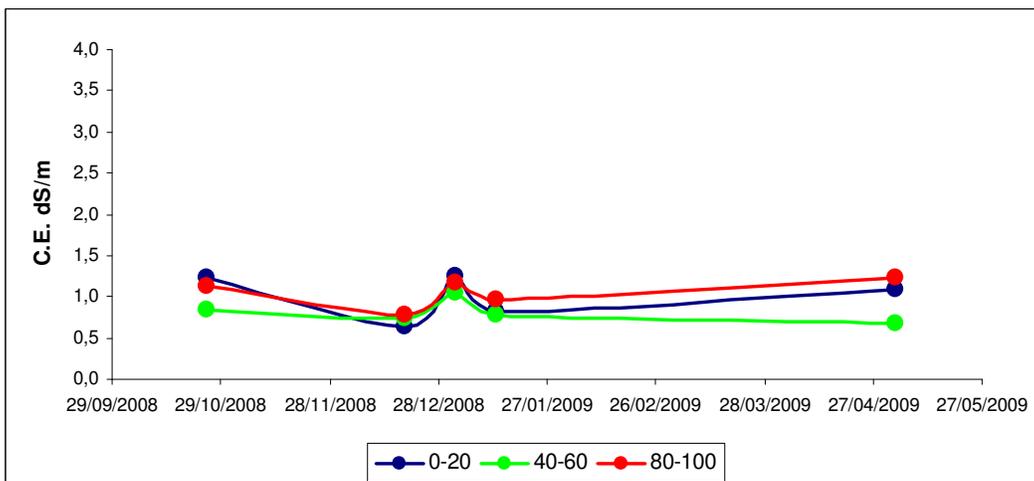


Figura 23: C.E. del extracto saturado para el ambiente de la loma.

Se puede observar que para el bajo un descenso constante de la C.E. en los 0-20 cm, y para 40-60 y 80-100 el comportamiento es similar, con un aumento hasta principios de enero del 2009 seguido de un marcado descenso, el cual se mantiene estable luego para los 40-60 cm y aumenta gradualmente para los 80-100 (Figura 20); en el caso de la media loma baja se observa que en los 0-20 cm se mantiene constante en el comienzo y luego en enero tiene un gran aumento de la C.E. seguida de un pronunciado descenso con valores inferiores a los que se registraron en el comienzo, para los 40-60 cm al comienzo hay un ascenso hasta enero donde se mantiene, en cuanto a los valores de C.E. para los 80-100 cm se mostraron constantes durante el periodo de seguimiento con un muy leve aumento del mismo (Figura 21); en la media loma alta para los 0-20 cm se observa un descenso a fines de diciembre del 2008 y principios de enero del 2009, en los 40-60 cm se observa un pico ascenso en la misma época y luego se mantiene y para los 80-100 se mantiene constante (Figura 22); y para la loma los valores de C.E. siguen un mismo patrón con un pico de aumento en principios de enero y se mantiene constante para el resto del periodo de estudio (Figura 23).

El cultivo de maíz se considera moderadamente tolerante a la salinidad observándose reducciones del 10% del rendimiento para 2,5 dS/m, 25% para 3,8 dS/m y 50% para 5,9 dS/m. (Ayers y Wescot, 1987, citado por Castañón, 2000).

La salinidad promedio del extracto saturado para el ciclo del cultivo de 1,56 dS/m en el bajo, 1,90 dS/m en la media loma baja, 1,49 dS/m en la media loma alta y 0,96 dS/m en la loma, con datos extremos de 3,36 dS/m en la media loma baja en el estadio del cultivo R3 en los primeros cm del suelo. Con los datos obtenidos podemos inferir que no hubo restricciones en cuanto a salinidad del suelo para el normal desarrollo del cultivo de maíz, salvo en la media loma baja para el estadio R3, pero no se observaron reducciones notables de rendimiento por esta causa debido a que en este ambiente es donde se obtuvieron los mejores rendimientos. Para esta situación la mayor salinidad del periodo se vio compensada con una mayor toma de agua desde la napa. El agua de la napa no sobrepasó la salinidad que produciría un 25% de merma del rendimiento

VI.4.3. pH del suelo.

El pH del suelo mostró valores más altos a medida que aumenta la profundidad del perfil, esto se debe al tipo de suelo con presencia de sales y sobre todo de Na en los horizontes más profundos donde el pH fue cercano a 10.

A su vez también hubo una pequeña tendencia a ascender el pH en el tiempo para los primeros cm del suelo, en profundidad se mostró un comportamiento más estable en el tiempo.

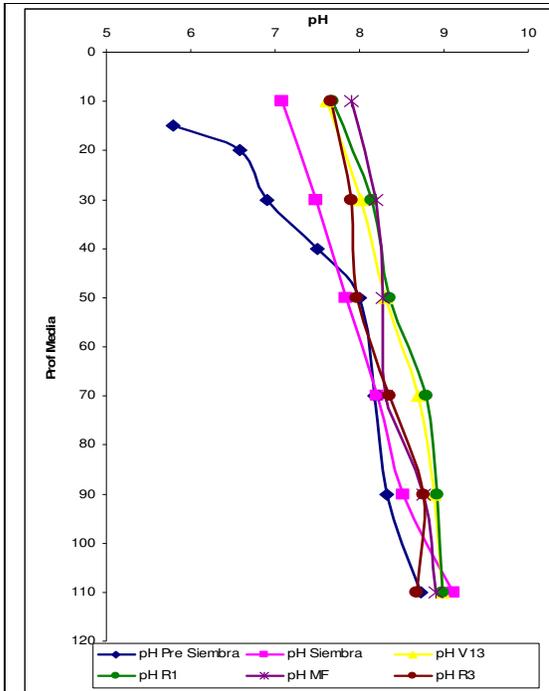


Figura 24: pH del suelo del bajo.

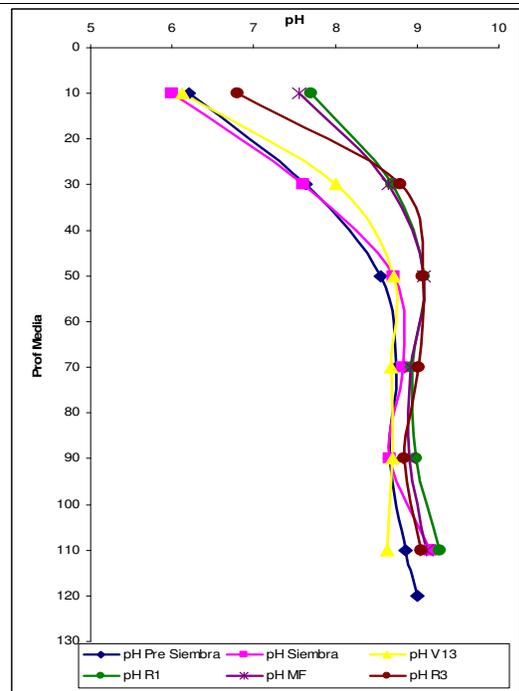


Figura 25: pH del suelo de la media loma baja.

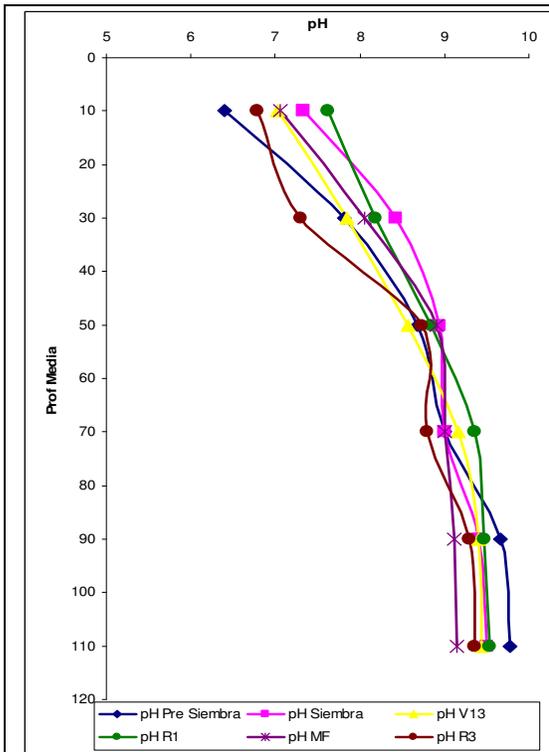


Figura 26: pH del suelo de la media loma alta.

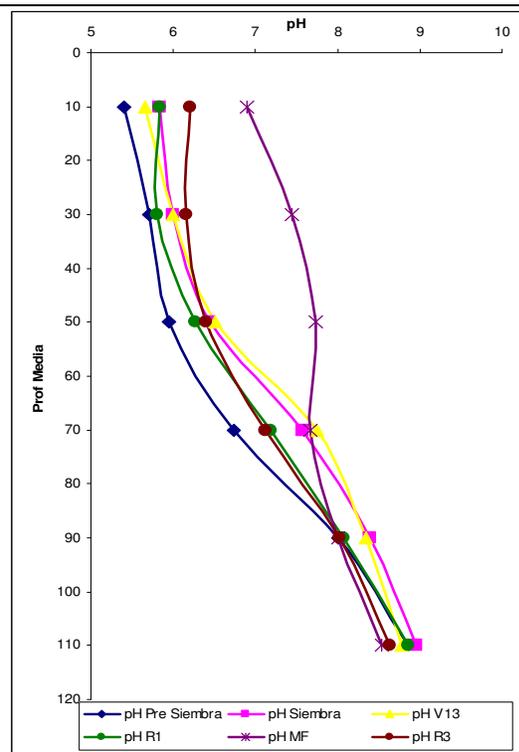


Figura 27: pH del suelo de la loma.

VI.5. Comportamiento del cultivo de maíz en relación a la posición en la toposecuencia.

VI.5.1. Densidad de plantas.

La densidad de siembra fue de aproximadamente 4,7 semillas por metro lineal, lo que equivale a 67000 plantas por hectárea.

La densidad fue para todo el ciclo de aproximadamente de 62700 plantas por hectárea en promedio para los cuatro ambientes y para todo el ciclo.

La densidad promedio del ciclo para el área de cada ambiente no mostró variaciones, el bajo tuvo una densidad promedio de 61400, la media loma baja 63800, la media loma alta 64000 y para la loma la densidad fue de 61300. Esto evidencia una baja diferencia entre posiciones en relación a la densidad del maíz. Es importante hacer notar en las áreas marginales para la producción, como en el caso del bajo, se observó pérdida de plantas, esto pudo deberse a que el suelo del bajo presenta algunas limitaciones para el normal desarrollo de las mismas debido a la presencia de un horizonte denso y en el que además estuvo anegado después de una lluvia intensa, lo que produjo la pérdida de plantas por anoxia.

VI.5.2. Materia seca aérea

Los rendimientos de materia seca fueron muy variables a través del tiempo observándose diferencias entre distintos estadios del cultivo y entre las distintas áreas correspondientes a cada freatímetro, aunque las diferencias estadísticamente significativas se observaron solo en el muestreo para MF, y para el ambiente de la media loma baja.

La principal causa a la que se debe tal diferencia de cantidad de biomasa es debido al ambiente que afecta el desarrollo de las plantas, una de las diferencias principales es la profundidad de la napa, la cual es una fuente complementaria de agua para el cultivo, además de la profundidad de la napa, el cultivo se vio afectado por el tipo de suelo y relieve como es en el caso del ambiente aledaño al freatímetro 1 el cual al estar ubicado en el bajo recibe aporte extra de agua por el escurrimiento desde las zonas mas altas y a su vez por la presencia de un horizonte densificado a unos 30 cm de profundidad el cual al tener una baja infiltración produce una napa colgada causando períodos de anegamiento y produciendo anoxia.

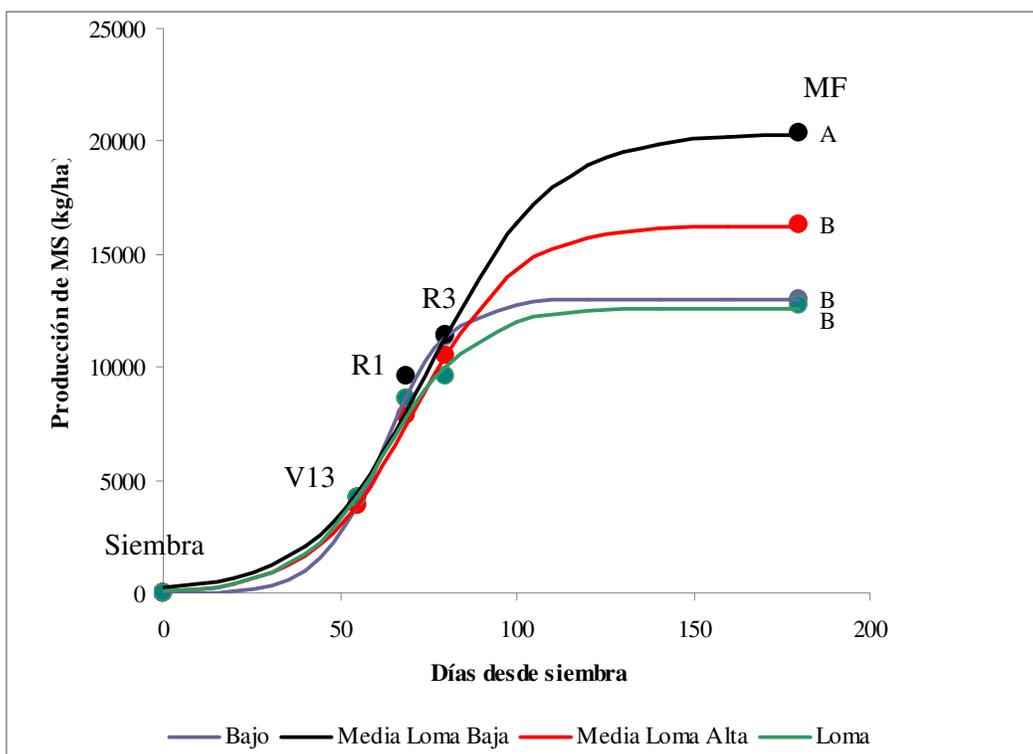


Figura 28: evolución del peso de biomasa aérea a través del tiempo para cada ambiente. Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$), representados sólo para MF. CV: 12,11. DMS: 3773,57.

Para el primer muestreo en V13 los rendimientos promedio de materia seca en kg/ha fueron de 3902 para el ambiente correspondiente al bajo, 4233 para la media loma baja, 3906 para la media loma alta y 4197 para la loma. En este momento no se observan diferencias significativas entre los cuatro ambientes. Esto puede deberse a que hasta ese momento el agua aportada por las precipitaciones fue suficiente para el desarrollo del cultivo.

En el segundo muestreo en R1 los rendimientos promedio de materia seca en kg/ha fueron de 8618 para el bajo, 9574 para la media loma baja, 7857 para la media loma alta y 8588 para la loma. En este momento comienza a notarse una diferencia de rendimiento a favor del área correspondiente a la media loma baja, pero de todas maneras esta diferencia no es estadísticamente significativa.

En el tercer muestreo en R3 los rendimientos promedio de materia seca fueron de 11318 kg/ha para el bajo, 11410 para la media loma baja, 10546 para la media loma alta y 9637 para la loma. Ya se puede observar diferencias de rendimiento descendientes desde el bajo hacia la loma, con una diferencia de casi 2000 kg de materia seca por hectárea entre el área correspondiente a la media loma baja y la loma. En este momento, en el que el cultivo se

encontraba finalizando su periodo crítico y de mayor requerimiento de agua, las precipitaciones fueron escasas y no cubrieron la demanda del cultivo. Estas diferencias aún no son estadísticamente significativas.

Para el último muestreo los rendimientos de materia seca en kg/ha fueron de 12980 para el bajo, 20359 para la media loma baja, 16273 para la media loma alta y 12752 para la loma. Es muy notable la diferencia de kg de materia seca entre los distintos ambientes, con una diferencia de casi 8000 kg/ha entre la media loma baja y la loma (Figura 28). También puede observarse que el ambiente correspondiente al bajo rindió notablemente menos que en la media loma baja y en la media loma alta, esto pudo deberse a las condiciones que afectaron durante el ciclo del cultivo, anegamiento en los primeros estadios y el déficit de agua en el período crítico, además del tipo de suelo en el que con falta de humedad se forma un horizonte densificado a los 30 cm de profundidad, esta densificación no se presenta en los suelos aledaños al resto de los freáticos. En este momento se encuentran diferencias estadísticamente significativas entre el ambiente de la media loma baja y el resto de los ambientes en estudio, entre los ambientes del bajo, media loma alta y de la loma no hay diferencias estadísticamente significativas.

Tabla 7: Biomasa acumulada para el cultivo de maíz en 4 situaciones de napa freática y profundidad de la napa para cada estadio.

	Estado Fenológico	Kg. de Materia Seca por Ha.	Profundidad de la napa (cm)
Bajo	V13	3.902	150
	R1	8.618	162
	R3	11.318	194
	MF	12.980	244
Media Loma Baja	V13	4.233	167
	R1	9.574	180
	R3	11.410	199
	MF	20.359	249
Media Loma Alta	V13	3.906	243
	R1	7.857	259
	R3	10.546	272
	MF	16.273	323
Loma	V13	4.197	317
	R1	8.588	331
	R3	9.637	347
	MF	12.752	391

VI.5.3. Rendimiento, IC, tasa de crecimiento y componentes del rendimiento.

- Tasa de crecimiento.

Como se puede apreciar en la Figura 29, se encontró una relación lineal positiva entre la tasa de crecimiento del cultivo (TCC) y el número de granos/m² de manera que a mayor TCC mayor es el N° de granos/ m², lo cual significa un mayor rendimiento del cultivo. Coincidiendo con los resultados obtenidos por Espósito (2002) dado que la tasa de crecimiento del maíz entre V13 y R3 define el número de granos producidos por el cultivo.

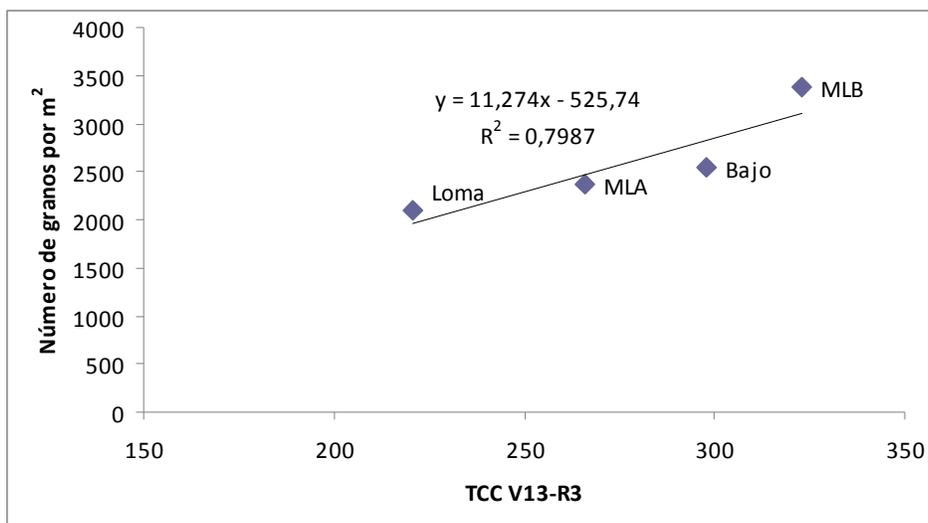


Figura 29: Relación entre TCC y Número de granos por m².

- Rendimiento (qq/ha)

El rendimiento tuvo el mismo comportamiento que el número y peso de los granos. Fue mayor en la media loma baja, seguido por el bajo y la media loma alta entre los cuales no hubo diferencia notable y por último el rendimiento mas bajo fue en la loma. Los rendimientos de grano en qq/ha fueron de 47,56 para el bajo, 82,54 para la media loma baja, 47,83 para la media loma alta y de 29,66 para la loma (Figura 30).

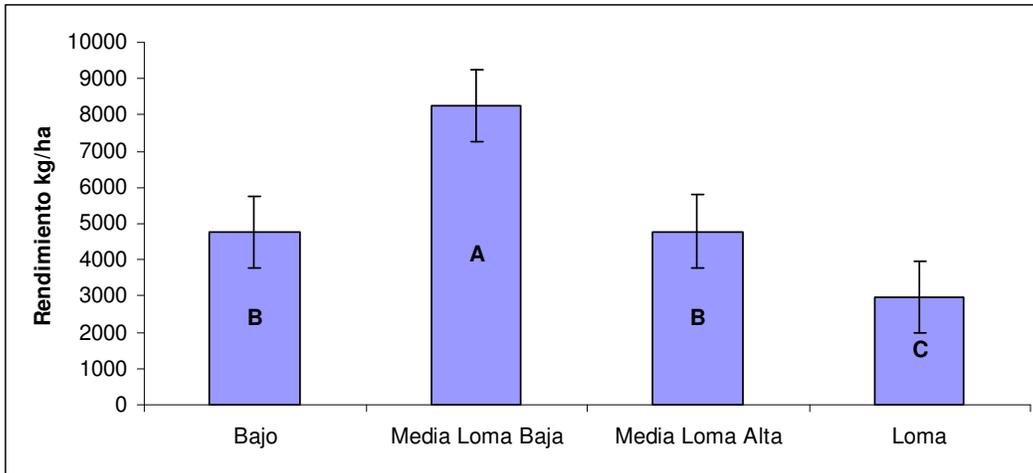


Figura 30: Rendimiento en Kg. de grano por hectárea para cada ambiente. Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$). CV 14,70. DMS 1523,64.

Se observa una diferencia de 52 qq de rendimiento entre la media loma baja y la loma, dejando en evidencia el efecto de aporte de agua por la napa freática al cultivo en la media loma baja y la falta de agua en la loma debido a la profundidad en la que se encuentra la napa que en este caso las raíces no pueden alcanzarla.

No obstante las mayores salinidades del agua de la napa encontradas en media loma alta y Loma, podrían explicar la falta de respuesta del maíz a la toma de agua de esos ambientes, lo cual exigiría mayores estudios de esta compleja relación profundidad-salinidad de la napa.

- Índice de cosecha

El índice de cosecha también se vio afectado por el ambiente correspondiente a cada freatómetro. El índice de cosecha promedio para el bajo fue del 40%, siendo este el valor mínimo registrado, en la media loma baja el mismo fue del 48%, en la media loma alta fue del 47% y en la loma el 44% (Figura 31).

Este muestra el mismo comportamiento general que los demás ítems analizados, ubicándose los valores mínimos en el bajo y la loma; y los máximos en la media loma baja seguidos por los valores de la media loma alta.

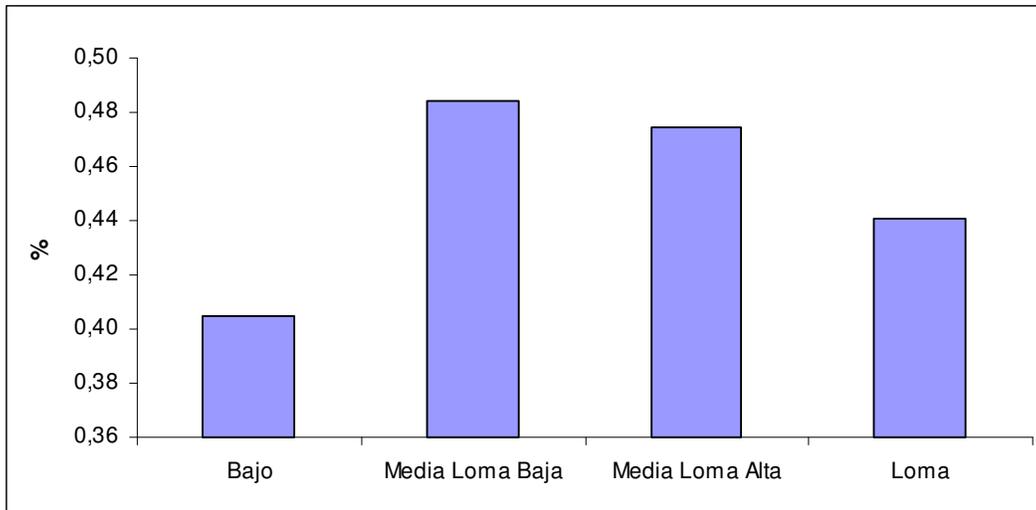


Figura 31: Índice de cosecha para el ambiente correspondiente a cada ambiente.

- Peso individual de los cariopses.

El peso de 100 cariopses fue variable para cada situación, notándose mayor peso para las situaciones donde rindió más. Para el bajo el peso de 100 fue de 29,12 gr., para la media loma baja fue de 34,84 gr., para la media loma alta fue de 29,02 gr. y para la loma fue de 20,18 (Figura 32). Esto deja en evidencia que el mayor déficit de agua en el llenado de granos afecta al peso de los mismos. El mayor peso de los granos fue en el área correspondiente a la media loma baja donde la napa se encuentra a menor profundidad y siendo un aporte complementario de agua.

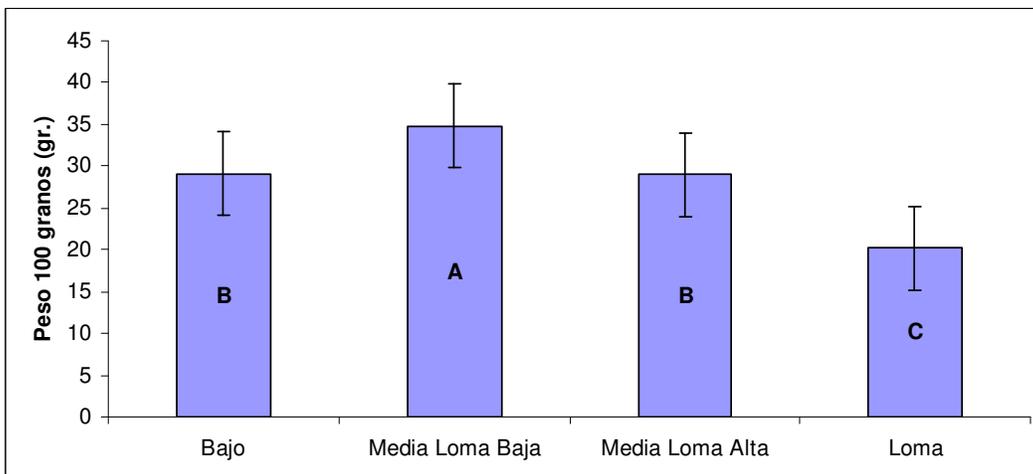


Figura 32: Peso de 100 granos correspondientes para cada ambiente. Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$). CV: 5,35. DMS: 3,02.

- **Número de cariopses por m².**

Se observa una variabilidad en relación al rendimiento en cuanto al número de cariopses por m². El número de granos por m² promedio para el bajo fue de 2321, para la media loma baja de 3384, para la media loma alta fue de 2360 y para la loma fue de 2100 (Figura 33). Se observa una diferencia de 1284 granos por m² entre la media loma baja y la loma. Se puede concluir que el déficit hídrico afecta también el número de granos por m².

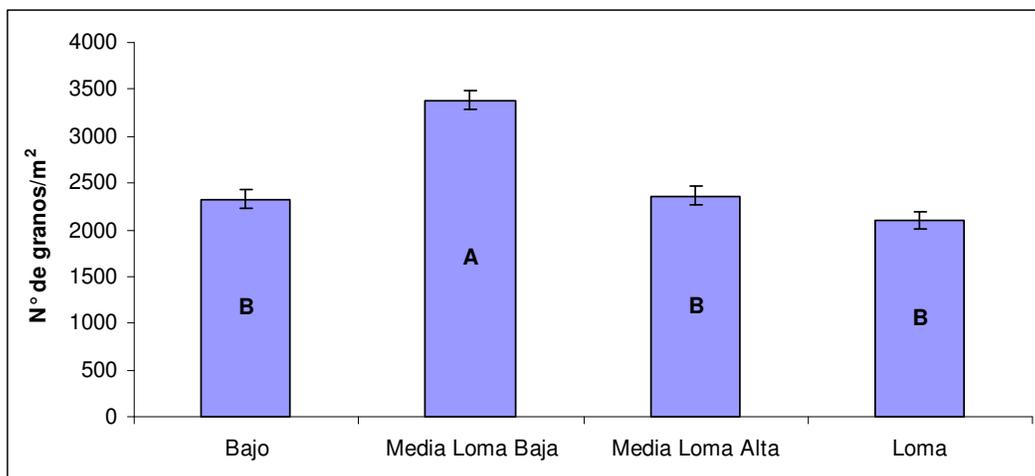


Figura 33: Número de granos por m² correspondientes a cada ambiente. Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) CV: 12,66. DMS: 642,6.

- **Componentes del rendimiento.**

En cuanto a los componentes del rendimiento en general se puede observar el mismo patrón de comportamiento siendo siempre los valores mínimos en el bajo y la loma, valores medios en la media loma alta y los valores máximos en la media loma baja.

Por tanto puede decirse que los distintos tipos de ambientes estudiados afectan de igual manera a cada uno de los componentes directos del rendimiento, nos referimos con esto al número de granos por m² y el peso de los granos, que a su vez afecta el rendimiento en kilogramos por hectárea producidos.

VI.5.4. Dinámica de crecimiento de raíces y su relación con la napa freática.

Para la representación gráfica de la dinámica de crecimiento de las raíces y su relación con la napa se utilizaron datos estimativos de la velocidad de crecimiento de las raíces para el cultivo de maíz (Dardanelli *et. al.*, 1997, citado por Satorre *et. al.*, 2003) representados gráficamente para Hapludoles del SO de Santa Fe.

Los últimos dos puntos de la profundidad de raíces son estimativos tomando como que el cultivo no profundiza mas sus raíces y para representar la profundidad de las mismas comparándolas con la profundidad de la napa y su ascenso capilar.

El frente capilar es estimativo 1 metro por encima de la profundidad del agua de la napa (Cisneros, 1994).

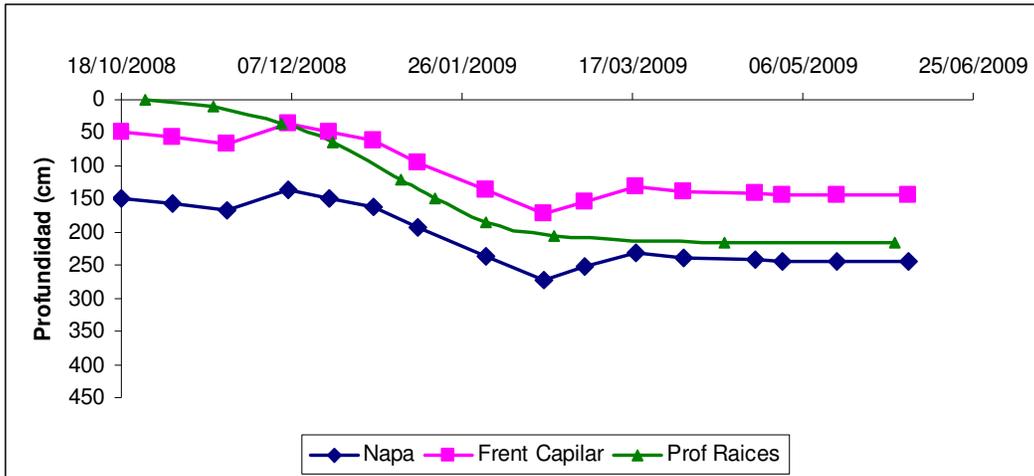


Figura 34: Representación gráfica de la profundidad de raíces, napa y ascenso capilar para la situación del Bajo.

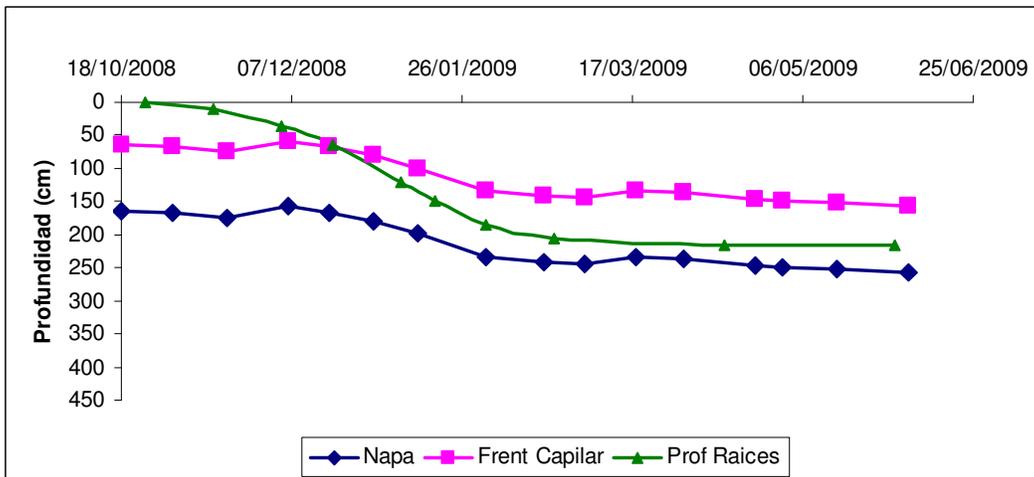


Figura 35: Representación gráfica de la profundidad de raíces, napa y ascenso capilar para la situación de la Media Loma Baja.

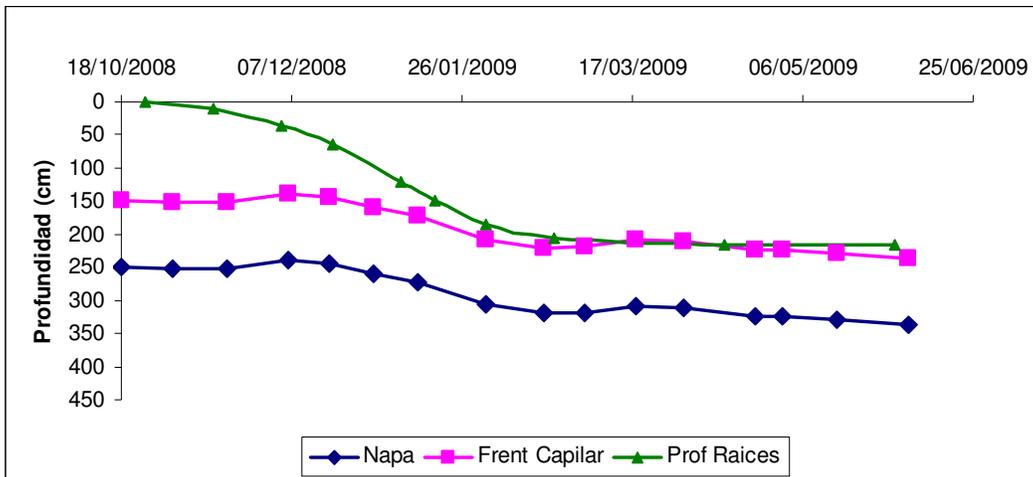


Figura 36: Representación gráfica de la profundidad de raíces, napa y ascenso capilar para la situación de la Media Loma Alta.

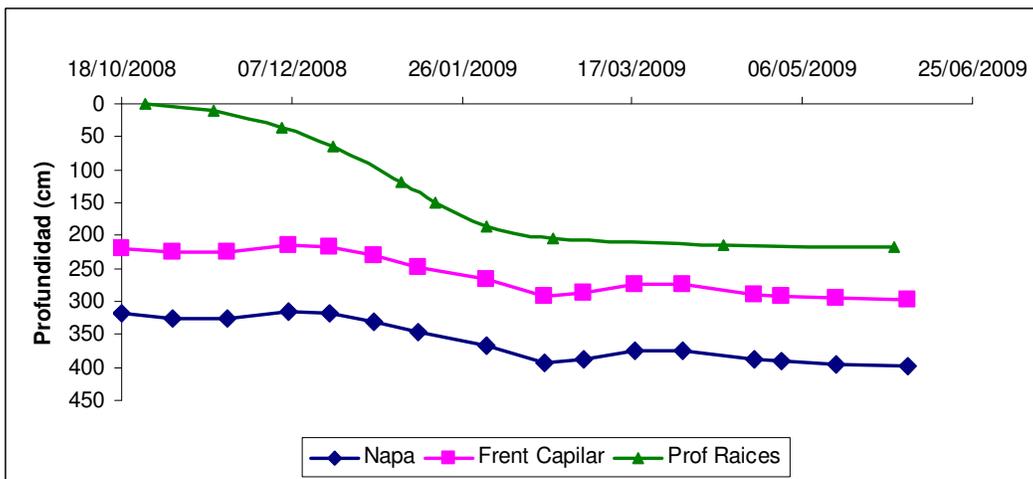


Figura 37: Representación gráfica de la profundidad de raíces, napa y ascenso capilar para la situación de la Loma.

Se puede observar claramente que para las situaciones del bajo y la media loma baja la profundidad estimada de las raíces hace contacto directo con el frente de ascenso capilar de la napa por lo que queda evidenciada la relación de las raíces del cultivo y el aporte de agua de la napa para estas situaciones, en el caso del bajo la productividad no fue alta debido a la limitación por la presencia de la napa colgada. Para la situación de la media loma baja la napa tuvo un rol importante en la alta productividad del cultivo. En el bajo se estima que las raíces hacen contacto con el frente capilar de la napa alrededor de los 40 días después de la siembra (Figura 34); y en la media loma baja lo alcanzan a aproximadamente los 55 días después de la siembra (Figura 35).

En el caso del ambiente relacionado a la media loma alta se puede observar que hubo un mínimo aporte de agua por parte de la napa, ya que las raíces no tuvieron buen alcance del frente de ascenso capilar de la napa, evidenciado esto por un rendimiento intermedio entre la media loma baja y la loma, dicho alcance se da aproximadamente a los 140 días después de la siembra (Figura 36).

Para la situación de la loma puede verse que la napa no tuvo ningún tipo de aporte de agua ya que las raíces no tuvieron contacto con el frente de ascenso capilar de la napa en ningún momento de ciclo del cultivo (Figura 37).

VI.5.5. Estimación del aporte de agua por la napa.

Con los datos de las precipitaciones, el contenido de agua del suelo y lo consumido por el cultivo, es estimó cuanta del agua que necesitó el cultivo para su ciclo fue aportada por el agua de la napa freática.

Existen divergencias en la bibliografía sobre la Eficiencia del Uso del Agua (EUA) por parte de maíz. Según Gregoret, *et al* (2006), el cultivo consume 1 mm de agua para producir 23 kg de materia seca por hectárea para las situaciones con napa somera (en este caso el bajo y la media loma baja) y 1 mm de agua para producir 20 kg de materia seca por hectárea en situaciones de napa profunda (media loma alta y loma en este caso).

Una estimación diferente es propuesta por Andrade y Sadras (2002), quienes estiman la EUA entre 19 y 25 kg de grano (aproximadamente 38 a 50 Kg de MS por mm de agua consumida, considerando un Índice de Cosecha de 50 %), es decir el doble de EUA que la propuesta por Gregoret et al (2006).

Comparando ambas estimaciones se muestran los posibles efectos sobre el consumo de agua del suelo para la situación estudiada, en las Tablas 8 y 9.

Tabla 8: producción de materia seca por hectárea, agua consumida por el cultivo, precipitaciones durante el ciclo del cultivo y aporte de agua del suelo, según EUA de Gregoret et al. (2006).

	KgMS/ha	Agua Consumida	Precipitaciones	Aporte Total Suelo	Contenido del suelo	Aporte Napa
Bajo	12980	564	494	70	40	30
MLB	20359	885	494	391	-17	408
MLA	16273	814	494	320	95	225
Loma	12752	638	494	144	67	77

Tabla 9: producción de materia seca por hectárea, agua consumida por el cultivo, precipitaciones durante el ciclo del cultivo y aporte de agua del suelo, según EUA de Andrade y Sadras (2002), considerando un 30 % de evaporación.

	KgMS/ha	Agua Consumida	Precipitaciones	Aporte Total Suelo	Contenido del suelo	Aporte Napa
Bajo	12980	422	494	-72	40	Cero*
MLB	20359	662	494	168	-17	185
MLA	16273	529	494	35	95	Cero*
Loma	12752	414	494	-80	67	Cero*

* Los aportes de la napa tomarían valores negativos, con lo cual se considera nulo su aporte.

Según las estimaciones de Gregoret et al (2006, Tabla 8), los resultados mostrarían que estimativamente en la media loma baja hubo un aporte de agua por parte de la napa freática del orden de 400 mm, en la media loma alta la napa aportaría 200 mm de agua, en la loma alrededor de 80 mm. En el bajo el aporte es menor no porque no se haya alcanzado la napa, sino que la producción se kg de materia seca fue baja por otros factores relacionados a la napa, y que ya fueron discutidos (anegamiento, anoxia, horizonte endurecido) por tanto el agua necesaria para producir dicha cantidad de materia seca fue menor.

No obstante según las estimaciones de Andrade y Sadras (2002), el aporte de la napa fue sólo en la Media Loma Baja, y fue del orden de 180 mm, en el resto de las situaciones más altas no habría habido aportes desde la napa. En el caso del bajo ya se discutieron las posibles causas de una baja productividad.

Estas estimaciones, no obstante, tiene algunas limitaciones como las siguientes:

- a. El cálculo de lámina se hizo sólo hasta el primer metro de profundidad del suelo, restando estimar el aporte desde mayores profundidades,
- b. No se tuvieron en cuenta pérdidas por escorrentía en el cálculo de las precipitaciones efectivas.
- c. Existen marcadas diferencias en EUA (entre 10 y 21 Kg grano/ mm de agua evapotranspirada) por efecto de la fertilización nitrogenada, que podría estar confundiendo los resultados de este trabajo (Gregoret et al., 2006; diferentes autores citados por Micucci y Alvarez en www.ipni.net).

A pesar de estas limitaciones, los resultados marcan la importancia del aporte capilar de la napa en la productividad del cultivo, en especial en las situaciones intermedias, fuera de la profundidad crítica. Los aportes de la napa estarían, para las situaciones intermedias, entre 180 y 400 mm para el ciclo completo del maíz. Se destaca por tanto la importancia del conocimiento de los niveles freáticos y su distribución espacial y temporal, a los fines de ajustar las tecnologías de manejo del cultivo en función de este recurso.

CONCLUSIONES

- Se cumpliría la hipótesis planteada en este trabajo ya que la napa freática aportó agua al cultivo de maíz de manera que los mayores rendimientos se obtuvieron en la media loma baja, este aporte de agua sería de entre 180 y 400 mm de agua, según diferentes EUA.

- El aporte de agua por parte de la napa freática afectaría significativamente los componentes directos del rendimiento, peso de los granos y número de granos por superficie, ya que estos fueron menores en los ambientes donde el cultivo no alcanzó el nivel freático.

- La napa sería un factor de influencia tanto positiva como negativa para el normal desarrollo de los cultivos, como en el caso del bajo en que el efecto fue negativo porque el nivel freático se encontró cercano a la profundidad crítica desplazando el oxígeno del suelo y por tanto produciendo anoxia en las raíces en momentos determinados provocando una menor, y en algunos sectores, hasta la nula producción debido a la muerte de plantas. En el caso de la loma se evidenció la producción de maíz sin, o con un mínimo aporte de agua por la napa, por lo tanto el cultivo tomaría agua proveniente sólo de las precipitaciones en ese año, que en este caso fueron muy por debajo de lo normal, sobre todo en el momento crítico de desarrollo del cultivo afectando de manera directa el rendimiento del mismo.

- La profundidad crítica de la napa para estas condiciones (suelo fuertemente sódico en profundidad) podría decirse que ronda alrededor de los 140 cm ya que esta fue la profundidad de la napa más somera en el bajo. En este caso para situaciones similares puede concluirse que estos ambientes no son propicios para la producción de maíz por lo que podría establecerse como no apto para producción agrícola.

- Viendo las diferencias productivas se pueden establecer diferentes manejos para cada ambiente en particular para optimizar su capacidad de uso, para el caso de la loma se podría disminuir la densidad de plantas, realizar prácticas de manejo tendientes a aumentar la cobertura del suelo, como realizar siembra directa, y así disminuir la pérdida de humedad por evaporación teniendo el perfil con mayor contenido de humedad, realizar un buen barbecho libre de malezas, uso de variedades resistentes a la sequía, entre otros.

BIBLIOGRAFÍA:

- ANDRADE, F. y V. SADRAS. 2002. **Efecto de la sequía sobre el crecimiento y el rendimiento de los cultivos. Bases para el manejo de maíz, girasol y soja.** Universidad de Mar del Plata. Balcarce
- BERNARDO, I; E. BONADEO; I. MORENO; M. BONGIOVANNI y R. MARZARI. 2005. **Agua. Material de apoyo didáctico. Sistema suelo planta.** Facultad de Agronomía y Veterinaria. Universidad Nacional de Río Cuarto. Argentina. 57-58
- CANTERO GUTIERREZ, A; J. M. CISNEROS; C. G. CHOLAKY; M. REYNERO y J. G. GONZALEZ. 2004. **Manejo de la condición física de los suelos: Manejo del agua. Material de apoyo didáctico. Uso y manejo de suelos.** Facultad de Agronomía y Veterinaria. Universidad Nacional de Río Cuarto. Argentina.
- CASTAÑÓN, G. 2000. **Ingeniería del riego. Utilización racional del agua.** Parainfo, S. A. Madrid. España.
- CHESTA, D. 2004. **Evaluación del riesgo de inundación-sedimentación en la unidad ambiental de lagunas interconectadas del sudeste de Córdoba.** Tesis. Facultad de Agronomía y Veterinaria. Universidad Nacional de Río Cuarto. Argentina.
- CISNEROS, J. M., J. J. CANTERO, A. CANTERO G. 1997. Relaciones entre la fluctuación del nivel freático, su salinidad y el balance hídrico, en suelos salino-sódicos del centro de argentina. Rev. UNRC 17 (1): 23-35.
- CISNEROS, J.M. 1994. **Caracterización de la afectación hidrohalomórfica en ambientes representativos del Centro Sur de Córdoba.** Tesis Magister en Ciencias del Suelo. Universidad Nacional de Río Cuarto. Inédita.
- CISNEROS, J. M., A. J. DEGIOANNI, J. J. CANTERO, A. CANTERO G. 2006. **Characterization and restoration of saline-sodic soils in Argentine Pampas.** Current Trends in Ecology. Vol 1, 57-75.
- DEGIOANNI, A., J. M. CISNEROS, A. CANTERO G. Y H. VIDELA. 2006. Modelo de simulación del balance hídrico en suelos con freática poco profunda 2006. **Ciencia del Suelo** 24 (1):29-38.
- ESPOSITO, G. 2002. **Propiedades hidrofísicas del suelo asociadas a diferentes sistemas de labranza en el cultivo de maíz.** Tesis Magister en Producción Vegetal. Universidad Nacional de Río Cuarto. Inédita
- ETCHEVEHERE, P. 1976. Normas de reconocimiento de suelos. INTA Castelar.
- GREGORET, M. C., J. DARDANELLI, R. BONGIOVANNI. Y M. DÍAZ-ZORITA. 2006. Modelo de respuesta sitio-específica del maíz al nitrógeno y agua edáfica en un hapustol. **Ci. Suelo** 24(2):147-159.

- INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGIA AGROPECUARIA – AGENCIA CÓRDOBA AMBIENTE. 2000. **Carta de suelos de la República Argentina. Hoja 3563-14 Buchardo.** Córdoba.
- JOBAGY, E. G; R. ARAGON y M. D. NOSETTO. Los cultivos y la napa freática en la llanura pampeana. Manejo de napas. **Agromercado.** 268: 8-10.
- MAGLIANO, V. 2006. **Productividad de la soja bajo diferentes profundidades de napa freática en la región de Laboulaye.** Tesis. Facultad de Agronomía y Veterinaria. Universidad Nacional de Río Cuarto. Argentina.
- MICUCCI, F. Y C. ÁLVAREZ. sin año. **El agua en los sistemas extensivos. III. Impacto de las prácticas de manejo sobre la eficiencia de uso del agua.** En www.ipni.net
- PIZARRO, F. 1978. **Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos.** Editorial Agrícola Española. Madrid. España.
- RICHARDS, L.A. 1973. **Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos.** 6^{ta} ed. Editorial Limusa, S. A. México D. F. México.
- SAGPYA. 2008. Estimaciones agrícolas – Cereales – Maíz. En: www.sagpya.gov.ar/0-0/index/agricultura/indexagricultura.htm. Consultado: 31-03-2008.
- SAINZ, F. 2007. **Productividad del girasol (Helianthus agnus L.) bajo diferentes profundidades de napa freática en la región de Del Campillo.** Tesis. Facultad de Agronomía y Veterinaria. Universidad Nacional de Río Cuarto. Argentina.
- SATORRE, E. H; R. L. BENECH ARNOLD; G. A. SLAFER; E. B. DE LA FUENTE; D. J. MIRALLES; M. E. OTEGUI y R. SAVIN. 2003. **Producción de granos. Bases funcionales para su manejo.** 1^{er} ed. Editorial Facultad Agronomía. Universidad de Buenos Aires.
- TELLERIA, G. 2005. El cultivo de trigo y la sustentabilidad del sistema de producción agrícola. **1° Jornada de Trigo de la Región Centro.** Argentina.
- VIDELA, H. 2006. **Producción de soja en suelos con capa freática somera en el departamento Roque Sáenz Peña (Córdoba).** Tesis. Facultad de Agronomía y Veterinaria. Universidad Nacional de Río Cuarto. Argentina.

ANEXO:

Análisis de la varianza

<u>Variable N</u>	<u>R²</u>	<u>R² Aj</u>	<u>CV</u>
<u>Kg Ms V13</u>	<u>12</u>	<u>0.36</u>	<u>0.00 15.25</u>

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo	1296026.67	5	259205.33	0.68	0.6575
Tratamiento	291518.00	3	97172.67	0.25	0.8562
Repetición	1004508.67	2	502254.33	1.31	0.3370
Error	2298444.00	6	383074.00		
Total	3594470.67	11			

Test:LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=1236.55643

Error: 383074.0000 gl: 6

<u>Tratamiento</u>	<u>Medias n</u>
2.00	4232.67 3 A
4.00	4196.67 3 A
3.00	3906.33 3 A
1.00	3901.67 3 A

Letras distintas indican diferencias significativas(p<= 0.05)

<u>Variable N</u>	<u>R²</u>	<u>R² Aj</u>	<u>CV</u>
<u>Kg Ms R1</u>	<u>12</u>	<u>0.45</u>	<u>0.00 20.30</u>

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo	14947216.25	5	2989443.25	0.97	0.5043
Tratamiento	4463199.58	3	1487733.19	0.48	0.7072
Repetición	10484016.67	2	5242008.33	1.70	0.2608
Error	18547934.67	6	3091322.44		
Total	33495150.92	11			

Test:LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=3512.72989

Error: 3091322.4444 gl: 6

Tratamiento	Medias	n	
2.00	9574.00	3	A
1.00	8618.00	3	A
4.00	8587.67	3	A
3.00	7856.67	3	A

Letras distintas indican diferencias significativas(p<= 0.05)

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Kg Ms R3	12	0.68	0.41	9.38

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	13311429.75	5	2662285.95	2.53	0.1450
Tratamiento	11088866.25	3	3696288.75	3.51	0.0892
Repetición	2222563.50	2	1111281.75	1.06	0.4049
Error	6319932.50	6	1053322.08		
Total	19631362.25	11			

Test:LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=2050.46895

Error: 1053322.0833 gl: 6

Tratamiento	Medias	n	
2.00	12244.00	3	A
1.00	11318.00	3	A B
3.00	10546.00	3	A B
4.00	9637.00	3	B

Letras distintas indican diferencias significativas(p<= 0.05)

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Kg Ms MF	12	0.87	0.77	12.11

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	146002829.17	5	29200565.83	8.19	0.0118
Tratamiento	114236742.67	3	38078914.22	10.67	0.0081
Repetición	31766086.50	2	15883043.25	4.45	0.0652
Error	21404764.83	6	3567460.81		
Total	167407594.00	11			

Test:LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=3773.56824

Error: 3567460.8056 gl: 6

Tratamiento	Medias	n	
2.00	20359.33	3	A
3.00	16272.67	3	B
1.00	12980.00	3	B
4.00	12752.00	3	B

Letras distintas indican diferencias significativas(p<= 0.05)

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Rinde Grano	12	0.93	0.87	14.70

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	44071222.50	5	8814244.50	15.16	0.0024
Tratamiento	44060383.00	3	14686794.33	25.25	0.0008
Repetición	10839.50	2	5419.75	0.01	0.9907
Error	3489556.50	6	581592.75		
Total	47560779.00	11			

Test:LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=1523.63905

Error: 581592.7500 gl: 6

Tratamiento	Medias	n	
2.00	8253.67	3	A
3.00	4782.67	3	B
1.00	4755.67	3	B
4.00	2966.00	3	C

Letras distintas indican diferencias significativas(p<= 0.05)

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Peso de 100	12	0.96	0.93	5.35

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	329.58	5	65.92	28.82	0.0004
Tratamiento	329.38	3	109.79	48.00	0.0001

Repetición	0.20	2	0.10	0.04	0.9578
Error	13.72	6	2.29		
Total	343.30	11			

Test:LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=3.02160

Error: 2.2873 gl: 6

Tratamiento	Medias	n	
2.00	34.84	3	A
1.00	29.12	3	B
3.00	29.02	3	B
4.00	20.18	3	C

Letras distintas indican diferencias significativas($p \leq 0.05$)

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
N° granos/m ²	12	0.83	0.68	12.66

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	2962144.92	5	592428.98	5.73	0.0277
Tratamiento	2958430.92	3	986143.64	9.53	0.0106
Repetición	3714.00	2	1857.00	0.02	0.9823
Error	620707.33	6	103451.22		
Total	3582852.25	11			

Test:LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=642.59955

Error: 103451.2222 gl: 6

Tratamiento	Medias	n	
2.00	3384.00	3	A
3.00	2360.00	3	B
1.00	2320.67	3	B
4.00	2100.33	3	B

Letras distintas indican diferencias significativas($p \leq 0.05$)