

UNIVERSIDAD NACIONAL DE RIO CUARTO
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA

Trabajo Final para optar al Grado de Ingeniero
Agrónomo

CALIBRACIÓN DE MÉTODOS
DE MEDICIÓN DE
VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN

Nombre del alumno: Marcos Maximiliano Omar Chiaramello
DNI: 32812480

Director: Carmen Cholaky

Rio Cuarto-Córdoba
Junio del 2014

UNIVERSIDAD NACIONAL DE RIO CUARTO
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA

Trabajo Final para optar al Grado de Ingeniero
Agrónomo

CALIBRACIÓN DE MÉTODOS
DE MEDICIÓN DE
VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN

Nombre del alumno: Marcos Maximiliano Omar Chiaramello
DNI: 32812480

Director: Carmen Cholaky

Rio Cuarto-Córdoba
Junio del 2014



ÍNDICE GENERAL

| | Página |
|--|---------------|
| RESUMEN..... | IX |
| SUMMARY..... | X |
| | |
| CAPÍTULO I | |
| INTRODUCCIÓN | |
| 1.1 Planteo de la problemática..... | 1 |
| 1.2 Antecedentes..... | 4 |
| 1.3 Hipótesis..... | 6 |
| 1.4 Objetivos | |
| 1.4.1 Objetivos general..... | 6 |
| 1.4.2 Objetivos específicos..... | 6 |
| | |
| CAPÍTULO II | |
| MATERIALES Y MÉTODOS | |
| 2.1 Área de trabajo..... | 7 |
| 2.2 Tratamiento y diseño experimental | 8 |
| 2.3 Métodos elegidos para medir la velocidad de infiltración | |
| 2.3.1 Anillo simple | 9 |
| 2.3.2 Doble anillo concéntrico..... | 10 |
| 2.3.3 Permeámetro de disco..... | 11 |
| 2.4 Evaluaciones..... | 12 |
| 2.5 Análisis estadístico. | |
| 2.5.1 Análisis descriptivo..... | 15 |
| 2.5.2 ANOVA..... | 16 |
| 2.5.3 Análisis de correlación. | |
| 2.5.3.1 Análisis gráfico..... | 16 |
| 2.5.3.2 Análisis estadístico..... | 16 |
| 2.5.4 Análisis de regresión lineal. | |
| 2.5.4.1 Análisis gráfico..... | 17 |
| 2.5.4.2 Análisis estadístico..... | 18 |
| 2.5.5 Validación de los supuestos del ANOVA. | |



| | |
|-----------------------------------|----|
| 2.5.5.1 Análisis gráfico..... | 19 |
| 2.5.5.2 Análisis estadístico..... | 19 |

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIONES

| | |
|---|----|
| 3.1 Análisis descriptivo de los datos..... | 21 |
| 3.2 ANOVA..... | 26 |
| 3.3 Análisis de correlación. | |
| 3.3.1 Análisis gráfico..... | 29 |
| 3.3.2 Análisis estadístico..... | 31 |
| 3.4 Análisis de regresión lineal. | |
| 3.4.1 Análisis gráfico..... | 32 |
| 3.4.2 Análisis estadístico..... | 36 |
| 3.5 Validación de los supuestos del ANOVA. | |
| 3.5.1 Análisis gráfico. | |
| 3.5.1.1 Normalidad de la distribución de los errores..... | 37 |
| 3.5.1.2 Homogeneidad de la varianza..... | 38 |
| 3.5.2 Análisis estadístico. | |
| 3.5.2.1 Normalidad de la distribución de los errores..... | 38 |
| 3.5.2.2 Homogeneidad de la varianza..... | 39 |
| 3.5.2.3 Independencia de los errores..... | 39 |
| 3.6 Discusión..... | 40 |

CAPÍTULO IV

| | |
|-------------------|----|
| CONCLUSIONES..... | 43 |
|-------------------|----|

CAPÍTULO V

| | |
|---|----|
| POSIBLES LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN..... | 44 |
|---|----|

CAPÍTULO VI

| | |
|-------------------|----|
| BIBLIOGRAFÍA..... | 45 |
|-------------------|----|



ÍNDICE DE FIGURAS

| | Página |
|--|---------------|
| Figura 1: Área de trabajo: sitio experimental..... | 7 |
| Figura 2: Disposición de las situaciones de uso y manejo..... | 8 |
| Figura 3: Situación 1, estaciones y mediciones. Donde: el rectángulo representa la situación, los círculos las estaciones o repeticiones y los triángulos los métodos de evaluación de infiltración (3 colores = 3 métodos)..... | 9 |
| Figura 4: Anillo simple. | 10 |
| Figura 5: Doble anillos concéntricos. | 10 |
| Figura 6: Permeámetro de disco. | 11 |
| Figura 7: Triada de métodos en una estación. | 12 |
| Figura 8: Planilla de campo. | 13 |
| Figura 9: Frente de Humedecimiento..... | 15 |
| Figura 10: Zona de Rechazo H_0 | 17 |



ÍNDICE DE TABLAS

| | Página |
|--|---------------|
| Tabla 1: Estadística descriptiva para los métodos de evaluación de velocidad de infiltración, de acuerdo a la situación de uso..... | 22 |
| Tabla 2: Estadística descriptiva para los métodos de evaluación del frente de humedecimiento de acuerdo a la situación de uso..... | 23 |
| Tabla 3: Síntesis de resultados obtenidos del ANOVA y comparación de media DGC para la variable velocidad de infiltración final para cada situación..... | 27 |
| Tabla 4: Síntesis de resultados del ANOVA para la variable humedad al inicio de cada medición para cada situación..... | 28 |
| Tabla 5: Síntesis de resultados obtenidos del ANOVA y comparación de media DGC para la variable frente de humedecimiento alcanzado para cada situación..... | 28 |
| Tabla 6: Síntesis de resultados del análisis de correlación entre los métodos del simple y doble anillo (primer par)..... | 31 |
| Tabla 7: Síntesis de resultados del análisis de correlación entre los métodos del permeámetro y doble anillo (segundo par)..... | 32 |
| Tabla 8: Tabla resumen de los resultados obtenidos del análisis de regresión lineal para el primer y segundo par de datos en los casos donde hubo evidencia estadísticamente significativa de correlación entre las variables..... | 36 |
| Tabla 9: Prueba Shapiro Wilks (Modificado)..... | 39 |
| Tabla 10: Prueba de Levene..... | 39 |
| Tabla 11: Prueba de Rachas..... | 39 |



ÍNDICE DE GRÁFICOS

| | Página |
|---|---------------|
| Gráfico 1: Curvas de velocidad de infiltración del método de infiltración permeámetro de disco para las tres situaciones de uso y manejo..... | 22 |
| Gráfico 2: Curvas de velocidad de infiltración del método de infiltración anillo simple para las tres situaciones de uso y manejo..... | 22 |
| Gráfico 3: Curvas de velocidad de infiltración del método de infiltración doble anillo para las tres situaciones de uso y manejo..... | 22 |
| Gráfico 4: Comparación de la velocidad de infiltración final media entre los 3 métodos para la situación agrícola pura (S1)..... | 25 |
| Gráfico 5: Comparación de la velocidad de infiltración final media entre los 3 métodos para la situación de uso agrícola-ganadera (S2)..... | 25 |
| Gráfico 6: Comparación de la velocidad de infiltración final media entre los 3 métodos para la situación de uso con mínima alteración (S3)..... | 25 |
| Gráfico 7: Comparación del frente de humedecimiento media entre los 3 métodos para la situación agrícola pura (S1)..... | 26 |
| Gráfico 8: Comparación del frente de humedecimiento media entre los 3 métodos para la situación de uso agrícola-ganadera (S2)..... | 26 |
| Gráfico 9: Comparación del frente de humedecimiento media entre los 3 métodos para la situación de uso con mínima alteración (S3)..... | 26 |
| Gráfico 10: Nube de puntos de la relación anillo simple vs el doble anillo para el total de muestras del primer par de datos (18 datos)..... | 29 |
| Gráfico 11: Nube de puntos de la relación anillo simple vs el doble anillo para la situación 1 | |



| | |
|--|----|
| del primer par de datos (6 datos)..... | 29 |
| Gráfico 12: Nube de puntos de la relación anillo simple vs el doble anillo para la situación 2 del primer par de datos (6 datos)..... | 30 |
| Gráfico 13: Nube de puntos de la relación anillo simple vs el doble anillo para la situación 3 del primer par de datos (6 datos)..... | 30 |
| Gráfico 14: Nube de puntos de la relación permeámetro vs el doble anillo para el total de muestras del segundo par de datos (18 datos)..... | 30 |
| Gráfico 15: Nube de puntos de la relación permeámetro vs el doble anillo para la situación 1 del segundo par de datos (6 datos)..... | 30 |
| Gráfico 16: Nube de puntos de la relación permeámetro vs el doble anillo para la situación 2 del segundo par de datos (6 datos)..... | 30 |
| Gráfico 17: Nube de puntos de la relación permeámetro vs el doble anillo para la situación 3 del segundo par de datos (6 datos)..... | 30 |
| Gráfico 18: Nube de puntos de la relación anillo simple vs el doble anillo para el total de muestras del primer par de datos (18 datos)..... | 33 |
| Gráfico 19: Nube de puntos de la relación anillo simple vs el doble anillo para la situación 1 del primer par de datos (6 datos)..... | 33 |
| Gráfico 20: Nube de puntos de la relación permeámetro de disco vs el doble anillo para el total de muestras del segundo par de datos (18 datos)..... | 33 |
| Gráfico 21: Nube de puntos de la relación permeámetro de disco vs el doble anillo para la situación 2 del segundo par de datos (6 datos)..... | 33 |
| Gráfico 22: Nube de puntos datos observados vs estimados del doble anillo para el total de muestras del primer par de datos (18 datos)..... | 34 |



Gráfico 23: Nube de puntos datos observados vs estimados del doble anillo para la situación agrícola pura (S1) del primer par de datos (18 datos)..... 34

Gráfico 24: Nube de puntos datos observados vs estimados del doble anillo para el total de muestras del segundo par de datos (18 datos)..... 35

Gráfico 25: Nube de puntos datos observados vs estimados del doble anillo para la situación agrícola-ganadera (S2) del primer par de datos (18 datos)..... 35

Gráfico 26: Prueba gráfica Q-Q plot para el total de muestras (18 datos) del primer par..... 37

Gráfico 27: Prueba gráfica Q-Q plot para la situación 1 (6 datos) del primer par..... 37

Gráfico 28: Prueba gráfica Q-Q plot para el total de muestras (18 datos) del segundo par..... 37

Gráfico 29: Prueba gráfica Q-Q plot para la situación 2 (6 datos) del primer par..... 37

Gráfico 30: Gráfico de dispersión residuo vs. predichos para el total de muestras (18 datos) del primer par..... 38

Gráfico 31: Gráfico de dispersión residuo vs. predichos para la situación 1 (6 datos) del primer par..... 38

Gráfico 32: Gráfico de dispersión residuo vs. predichos para el total de muestras (18 datos) del segundo par..... 38

Gráfico 33: Gráfico de dispersión residuo vs. predichos para la situación 2 (6 datos) del primer par..... 38



RESUMEN

La **velocidad de infiltración final (VIF)** es un **indicador de calidad del suelo**, haciéndose necesario medirla para poder manejarla. Hay distintas metodologías para medirla a campo, algunos requieren instrumentos de gran magnitud y de difícil manipulación. Por ello el objetivo de éste trabajo fue calibrar, mediante **ecuaciones de regresión**, entre 3 metodologías comúnmente usadas para medir la **VIF** (permeámetro de disco (**PD**), anillo simple (**AS**) y doble anillo (**DA**)) del suelo a y comprobar la existencia o no de relación entre la del **AS** y **PD** con la del método estándar del **DA**. La hipótesis a probar fue la existencia de relación directa entre las mediciones de **VIF** con el **DA** y las realizadas por los métodos del **AS** y **PD**, por tanto existe la posibilidad de encontrar ecuaciones matemáticas que permitan relacionar los resultados obtenidos con cada uno de ellos y los obtenidos con el método del **DA**. Las mediciones se llevaron a cabo bajo 3 situaciones distintas de uso y manejo (Agrícola pura (**S1**), agrícola-ganadera (**S2**) y mínima alteración (**S3**)) de un suelo **Hapludol Típico** de la zona de **Río Cuarto**, Córdoba. En cada situación se realizaron 6 repeticiones y se midió la **VIF** del agua en el suelo a través de los tres métodos mencionados. Cada repetición se conformó de una triada de datos correspondientes a una medición de la **VIF** por el método del **AS**, una con el de **DA** y una tercera con el **PD**, con un total 18 repeticiones. Los resultados arrojaron que hubo evidencia estadísticamente significativa de correlación ($p > 0,05$), con un R^2 mayor al 55% para el primer par de datos **AS** vs **DA** para el total de repeticiones y en la **S1** y, para el segundo par de datos **PD** vs **DA** para los 18 datos y en la **S2**, respectivamente. Sin embargo las 4 ecuaciones encontradas presentaron un **error de predicción** mayor al 25%, determinando que no podría utilizarse a ninguna de ellas como predictora para el cálculo de **VIF** del **DA** a partir de los resultados obtenidos a campo con el método del **AS** o del **PD**.

Palabras claves: Velocidad de infiltración, comparación de métodos de infiltración, permeámetro de disco, simple anillo, doble anillo concéntrico.



SUMMARY

The final infiltration rate (**FIR**) is an indicator of soil quality, making it necessary measure to handle. There are different methodologies to measure a field, some instruments require large and difficult to handle. Thus, the aim of this work was calibrated by regression equations between three methods commonly used to measure the **FIR** (disc permeameter (**DP**), simple ring (**SR**) and double ring (**DR**)) ay ground check for or not the relationship between **SR** and **DP** with the standard **DR** method. The hypothesis was to prove the existence of a direct relationship between **FIR** measurements and the **DR** conducted by the methods of **SR** and **DP**, therefore the possibility of finding mathematical equations that connect the results obtained with each of them and those obtained with the method of **DR**. The measurements were carried out fewer than three different conditions of use and handle (Agricultural pure (**S1**), agriculture and livestock (**S2**) and minimum impairment (**S3**)) of a soil **Hapludol Tipic** near **Rio Cuarto**, Cordoba. In each situation, 6 replicates were performed and the **FIR** water was measured in the soil through the above three methods. Each replicate was formed by a triad of data corresponding to a measurement by the method of **FIR SR**, a **DR** with the ring and a third **DP**, or in total 18 replications. The results showed that no statistically significant evidence of correlation ($p > 0.05$), with R^2 greater than 55% for the first couple of **DR** vs **SR** data for total reps and the **S1** and, the second pair of **DR** vs **PD** data for the 18 data and **S2**, respectively. However, the four equations found had an error greater prediction to 25%, determining that could not be used with any of them as a predictor for calculating **FIR** of the **DR** using the results to the field with the methods of the **SR** or **PD**.

Key words: infiltration speed, comparison of methods of infiltration, permeameter of disc, single ring, double concentric ring.



CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 Planteo de la problemática

A pesar de la importancia para la vida, el suelo no ha recibido de la sociedad la atención que merece. Su degradación es una seria amenaza para el futuro de la humanidad. Por lo tanto, los científicos se enfrentan al triple desafío de intensificar, preservar e incrementar la calidad de la tierra. Para ello, es necesario contar con una sólida concepción de la calidad y con indicadores de calidad de la tierra y de manejo sostenible de la misma, tal como se cuenta para dar seguimiento a variables sociales y económicas (Cruz Bautista, et. al., 2004).

La productividad y sustentabilidad agronómica están determinadas por los efectos interactivos de la calidad del suelo, de los factores ambientales y del manejo. Interpretar y predecir los efectos del manejo sobre la calidad del suelo a través de indicadores confiables y sensibles constituye una de las principales finalidades de la ciencia del suelo moderna (Quiroga y Funaro, 2004).

La calidad debe interpretarse como la utilidad del suelo para un propósito específico en una escala amplia de tiempo (Carter *et al.*, 1997). Para Gregorich *al.* (1994) la calidad de suelo es una medida de su capacidad para funcionar adecuadamente con relación a un uso específico.

La calidad de muchos suelos de diversas áreas de nuestro planeta ha declinado significativamente desde que sistemas pastoriles o forestales fueron paulatinamente reemplazados por la actividad agrícola (Ferrerías et al., 2007). Debido a que el suelo es un componente fundamental de la biosfera, se ha incrementado, en los últimos años el interés en evaluar la calidad y la salud del mismo. Esta calidad o aptitud productiva puede ser medida a través de sus propiedades físicas, químicas y/ o biológicas, conocidas como indicadores de calidad de suelo. Un indicador es una variable que resume o simplifica información relevante haciendo que un fenómeno o condición de interés se haga perceptible y que cuantifica, mide y comunica, en forma comprensible, información relevante (Cantú *et al.*, 2007).

Los indicadores deben ser preferiblemente variables cuantitativas, aunque pueden ser cualitativas o nominales o de rango u ordinales, especialmente cuando no hay disponibilidad de información cuantitativa, o el atributo no es cuantificable, o cuando los costos para cuantificar son demasiado elevados. Las principales funciones de los indicadores son:



evaluar condiciones o tendencias, comparar transversalmente sitios o situaciones, para evaluar metas y objetivos, proveer información preventiva temprana y anticipar condiciones y tendencias futuras (Cantú *et al.*, 2007).

Para un suelo, estos indicadores pueden ser propiedades físicas, químicas y biológicas, o procesos que ocurren en él (SQI, 1996).

Hünemeyer *et al.* (1997) establecieron que los indicadores deberían permitir: (a) analizar la situación actual e identificar los puntos críticos con respecto al desarrollo sostenible; (b) analizar los posibles impactos antes de una intervención; (c) monitorear el impacto de las intervenciones antrópicas; y (d) ayudar a determinar si el uso del recurso es sostenible.

Según Doran & Zeiss (2000), los indicadores deben ser:

- Limitados en número y manejables por diversos tipos de usuarios;
- Sencillos, fáciles de medir y tener un alto grado de agregación, es decir, deben ser propiedades que resuman otras cualidades o propiedades;
- Interdisciplinarios; en lo posible deberán contemplar la mayor diversidad de situaciones por lo tanto incluir todo tipo de propiedades de los suelos (químicas, físicas, biológicas, etc.);
- Tener una variación en el tiempo tal que sea posible realizar un seguimiento de las mismas, asimismo, no deberán poseer una sensibilidad alta a los cambios climáticos y/o ambientales pero la suficiente como para detectar los cambios producidos por el uso y manejo de los recursos

Rossi Silva, (2004) sostiene que las propiedades hidráulicas de los suelos, entre ellas la velocidad de infiltración, se pueden utilizar como un buen indicador de la estabilidad estructural. Coincidente con ello, Aoki y Sereno (2006) sostienen que uno de los **indicadores principales** para evaluar la calidad, está dada por la **velocidad de infiltración** del agua en el suelo.

La infiltración es el componente hidrológico más importante en la mayoría de las cuencas, capaz de disminuir el volumen y caudal de escurrimiento. Tanto la velocidad de infiltración inicial (inmediatamente comenzado el proceso) como la velocidad de infiltración final o base (luego de la estabilización del valor de velocidad de infiltración), constituyen las válvulas que regulan el ingreso de agua al perfil de suelo y de manera complementaria las pérdidas de agua por escurrimiento (Cisneros *et al.*, 2012).

La **velocidad de infiltración** se comporta como un **indicador de calidad del suelo**, válido para detectar diferencias significativas en las propiedades del horizonte superficial de un suelo virgen y en un agroecosistema alterado (Aoki y Sereno, 2006), haciéndose necesario medir este fenómeno para poder manejarlo.

Cada suelo tiene una tasa de infiltración característica que depende de sus propiedades intrínsecas, pero también del manejo del suelo y del agua de riego, así como de ciertos factores climáticos como la lluvia y el viento. La caracterización de la tasa de infiltración de los suelos es fundamental no sólo para el diseño y el manejo apropiado de los sistemas de riego, sino también para detectar las pérdidas de estabilidad estructural, cuantificar la susceptibilidad de los suelos al sellado superficial o encostramiento, y estimar ciertas propiedades físicas del suelo tales como la distribución del tamaño de poros o el transporte de agua y solutos (Jaramillo et al., 2000).

Desde el punto de vista de las metodologías comúnmente utilizadas para medir el proceso de infiltración a campo, se destacan: a) infiltrómetros, b) análisis de hidrogramas de escorrentía en cuencas pequeñas, c) lisímetros (Segerer y Villodas, 2006). Algunos requieren instrumentos de gran magnitud, con resultados más fiables que otros, pero los problemas de costos y manipulación, por lo general requieren el uso de equipos más pequeños y más baratos con resultados menos fiables, pero a los fines prácticos muy útiles. El uso del infiltrómetro de anillo simple, proporciona probablemente el mejor método alternativo para la obtención de datos de manera sencilla y económica (Johnson, 1991).

En el grupo de los infiltrómetros: a) anillo simple, b) doble anillo concéntrico y c) permeámetro de disco, la cuantificación de la infiltración en campo se efectúa clásicamente mediante la medida en el tiempo del descenso de una lámina de agua contenida en un simple, doble anillo o tubo graduado respectivamente (Bouwer, 1986).

El fundamento del presente trabajo se sustentó en la base matemática de encontrar una relación de ajuste entre los métodos del anillo simple y doble anillo concéntrico, y entre el permeámetro de disco y doble anillo concéntrico. Este criterio de comparación de ambos métodos mencionados con el doble anillo fue porque esta última metodología es considerada como estándar para la medición de la infiltración a nivel mundial (ASTM, 2008).

El objetivo de este trabajo es contribuir a solucionar la problemática planteada de usar instrumentos de gran magnitud y elevado requerimiento de agua como en el caso del método del doble anillo concéntrico, y encontrar un ajuste tal que permita hacer uso de un

instrumental sencillo y económico como lo son el anillo simple y el permeámetro, y obtener así resultados aceptables al correlacionar los datos obtenidos entre estas dos últimas metodologías con el doble anillo. Esto permitiría usar instrumentos más chicos y manejables, un menor consumo de agua y lo que ello significa desde el punto de vista de la logística de la medición, un aumento en el número de repeticiones, entre otros aspectos. De esta forma los datos obtenidos podrían ser transformados, mediante una ecuación de ajuste, a los esperables de obtener por el método del doble anillo.

1.2 Antecedentes

Wu (1997) y Wu et. al (1999), en USA, trabajaron con diferentes infiltrómetros de anillo simple de diferentes diámetros (12, 20 y 40 cm), diferentes profundidades de inserción en el suelo (2, 5 y 10 cm) y diferentes cargas de agua (0, 2, 5 y 20 cm). Los resultados arrojaron que la infiltración no era sensible ni a la carga de agua, ni al diámetro del anillo y tampoco a la profundidad de inserción.

Prieto et. al. (2006), en Córdoba, Colombia, evaluaron el desempeño de la metodología del infiltrómetro de tensión de disco, comparado con el infiltrómetro de anillos para determinar conductividad hidráulica saturada (Ksf) en suelos del Sinú. Se seleccionaron dos suelos: un Endoacuept arcilloso y un Haplustepts arenoso. En cada suelo se realizaron pruebas de infiltración simultáneas con ambos métodos hasta alcanzar la infiltración estacionaria para luego calcular los correspondientes valores de Ksf. Los valores de Ksf obtenidos con infiltrómetro de anillos fueron significativamente mayores a los conseguidos con el infiltrómetro de tensión de disco, debido probablemente a las diferencias en la profundidad de instalación de los equipos y la relativa mayor área cubierta por el infiltrómetro de anillos.

Gómez et. al. (2008), construyeron un infiltrómetro portátil de carga constante y anillo sencillo (IPCCAS) como variante a los infiltrómetros de presión utilizados en la caracterización de la conductividad hidráulica saturada a campo (Ksf) por Prieksat et al., (1992) y Wu et al., (1999). El dispositivo de carga constante, consiste en un anillo simple y tubo de mariotte graduado, separados físicamente y conectados por una manguera flexible que facilita el proceso de recarga de éste último, sin afectar la inserción del anillo y un tubo de burbujeo que es el que permite ajustar la carga hidráulica deseada. A este nuevo infiltrómetro le aplicaron tres métodos para calcular la Ksf. Los métodos Wu1 y Wu2 en los

que se aplica una sola carga, pero el primero mide la diferencia en el contenido de humedad entre el inicio de las mediciones y el final de las mismas $\Delta\theta$, mientras que el segundo no. El tercer método consiste en aplicar dos cargas, pero al igual que el método Wu2, no considera $\Delta\theta$. Posterior a las mediciones obtenidas, se contrastaron los resultados de K_{sf} obtenidos de cada método con la K_{sf} obtenida con un permeámetro Guelph (método K_{sf} Guelph). El trabajo se realizó bajo distintas condiciones edáficas. La conclusión a la que arribaron fue que de los tres métodos para la medición de la K_{sf} aplicados con el dispositivo construido y comparados con el de referencia (permeámetro de Guelph), el método Wu2 de carga constante, fue el más apropiado por trabajar con la mitad del agua requerida por el método de dos cargas (DCAS) y sin la necesidad de obtener el valor $\Delta\theta$. Una desventaja de este infiltrómetro fue que funcionaba solo a nivel superficial, y no permitió obtener datos de K_{sf} a profundidad, como algunos dispositivos comerciales. Aún con las desventajas y limitaciones que presentó el IPCCAS, permitió obtener datos de campo para estimar la K_{sf} a un costo inferior al de los equipos comúnmente utilizados para este fin.

Moret y González (2009), presentan un método que, aplicado a un nuevo diseño de infiltrómetro de disco, permite calcular caudales (Q) a partir de la pérdida de carga (ΔHT) producida en un tubo cilíndrico. El método consiste en un sistema de doble mariotte donde ΔHT se mide en un tubo de mariotte conectado a un depósito de agua a través de un tubo de silicona de 2 mm de diámetro y 1000 mm de longitud. Este método fue testeado en laboratorio y en condiciones de campo donde los valores medidos de ΔHT y Q fueron contrastados con sus valores teóricos. La excelente correlación ($r^2 = 0.99$) entre los valores teóricos de ΔHT y Q y los correspondientes valores experimentales obtenidos, tanto en laboratorio como en campo, indican que este método es una alternativa viable a los métodos convencionales de medida de tasa de infiltración comúnmente utilizados en infiltrometría de disco.

Walsh y McDonnell (2012) utilizaron un infiltrómetro de anillo simple y uno de doble anillo, para medir la infiltración a campo y comparar entre ambos métodos. Los ensayos se realizaron en un suelo arcilloso que provenía de una rotación trigo-maíz. El resultado fue que no hubo diferencias significativas en las tasas de infiltración entre métodos, lo cual se atribuyó a la práctica de saturación del suelo antes de medir la velocidad de infiltración, lo que indica que estos métodos son igualmente adecuados para la determinación de la tasa de infiltración cuando se trabaja a nivel de lote.



1.3 Hipótesis

Existe una relación directa entre las mediciones de infiltración saturada con doble anillo y las realizadas por otras metodologías del grupo de los infiltrómetro, por tanto es posible encontrar ecuaciones matemáticas que permitan relacionar los resultados obtenidos con cada uno de ellos y los obtenidos con el método del doble anillo.

1.4 Objetivos

Objetivo General

- Evaluar diferentes metodologías de medición de velocidad de infiltración del suelo a un régimen de saturación y encontrar relación entre ellas mediante ecuaciones de regresión.

Objetivos específicos

- Medir a campo la velocidad de infiltración con los métodos del permeámetro de disco, infiltrómetro simple y el de doble anillo concéntrico.

- Encontrar relaciones matemáticas que permitan ajustar los resultados obtenidos con los métodos anteriormente mencionados, respecto al método del doble anillo concéntrico.

CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Área de trabajo

El trabajo se realizó en los meses de agosto y septiembre de 2013, en el campo de docencia y experimentación de la UNRC, ubicado sobre la Ruta Nac. 36 km 601 (Figura 1).

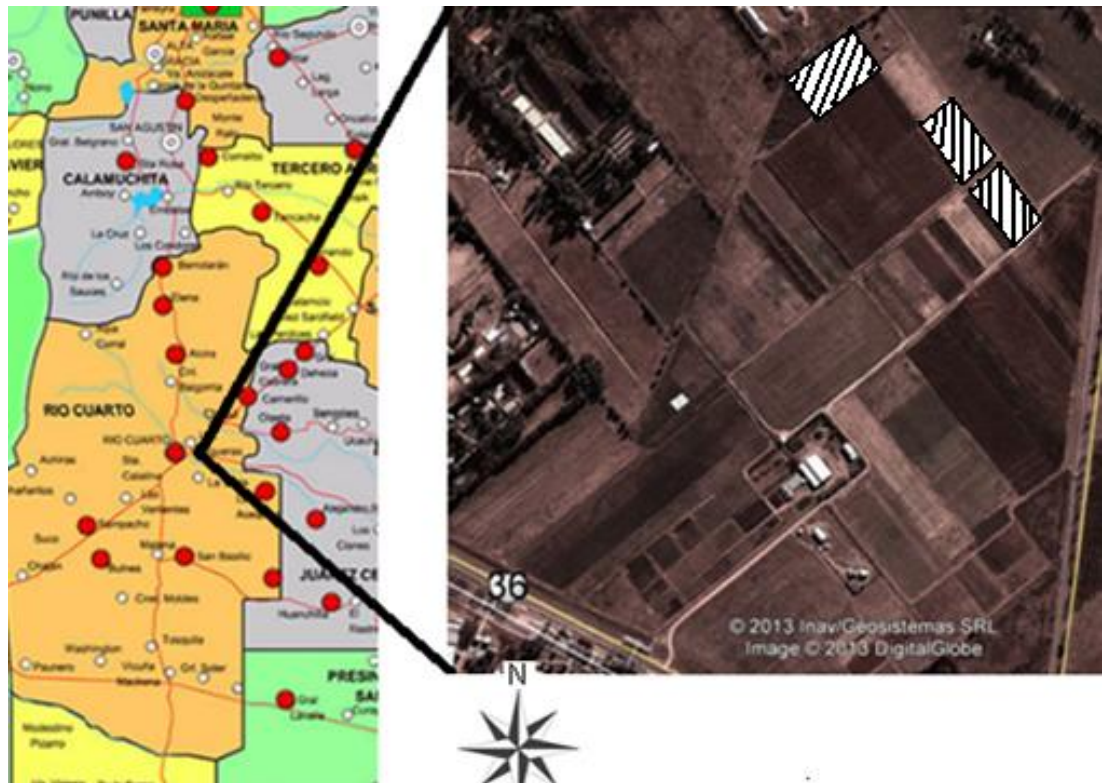


Figura 1: Área de trabajo: sitio experimental.

El clima del área se caracteriza por ser de tipo mesotermal, subhúmedo (Cantero et al., 1986). El régimen térmico es de tipo templado continental con una temperatura media anual de 16,3 °C. La temperatura media del mes más cálido (enero) es de 23,5°C para toda el área mientras que la temperatura del mes más frío (julio) es entre 9,5 y 8,5 °C disminuyendo hacia el sector SO. La amplitud térmica media anual es 14°C en el sector NNO y de 16 °C en el sector SSE. Las lluvias de la región presentan un patrón similar tanto en la ocurrencia y como en la cantidad precipitada. La distribución estacional se ajusta a un régimen monzónico siendo diciembre - enero y junio- julio los períodos de mayores y menores precipitaciones respectivamente (Jarsún et al., 2003). Las precipitaciones medias anuales oscilan entre 700-800 mm, con régimen de precipitación monzónico que concentra el 80% de las lluvias entre octubre y abril (Degioanni, 1998).

El suelo es un Hapludol típico de textura franca arenosa muy fina, cuya granulometría en los primeros centímetros es: 16% de arcilla, 41% de limo, 33% de arena muy fina, 10% de otras fracciones de arenas (Bricchi, 1996). El contenido de materia orgánica es del orden del 4,03% en condición cuasi natural y 1,75% en las cultivadas.

2.2 Tratamientos y diseño experimental

2.2.1 Tratamientos

El ensayo a campo comprendió tres situaciones con diferente historia de uso y manejo, con el fundamento de considerar el error experimental asociado al uso del suelo sobre la/s posible/s relaciones entre los métodos de medición de la velocidad de infiltración.

- **Situación 1 (S1):** corresponde a un lote cuyo historial es Agrícola Pura (A), actualmente con rastrojo de maíz campaña 2012-2013 que provenía de un cultivo antecesor soja, ambos cultivos realizados en siembra directa.

- **Situación 2 (S2):** El historial de éste lote es Ganadero-Agrícola (GA), actualmente hay en el rastrojo de maíz con antecesor pastura de alfalfa de cuatro años de implantación, usada exclusivamente para corte.

- **Situación 3 (S3):** Esta última situación es la que corresponde a la Mínima Alteración (MA), ya que durante los **últimos 40 años no ha sido** destinado al uso agrícola o ganadero. Este predio está ubicado en una clausura del Campo de Docencia Experimental de la Universidad Nacional De Rio Cuarto (CAMDOCEX).



Figura 2: Disposición de las situaciones de uso y manejo.

En las tres (3) condiciones antes mencionadas, se midió en seis (6) estaciones la velocidad de infiltración del agua en el suelo a través de tres métodos de medición. Cada estación (repetición) se conforma de una triada de datos correspondientes a una medición de la velocidad de infiltración por el método del simple anillo, una con el de doble anillo concéntrico y una tercera con el permeámetro de disco. A continuación de manera esquemática se muestra en la figura 3 como se distribuyeron las estaciones y las mediciones dentro de una situación.

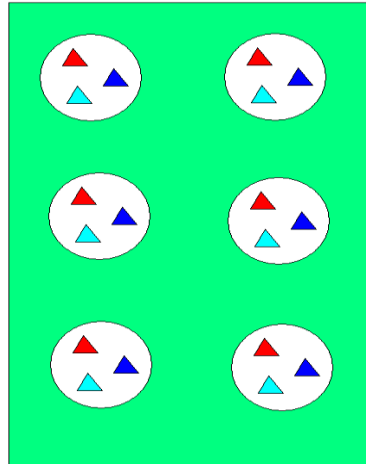


Figura 3: Situación 1, estaciones y mediciones.

Donde: el rectángulo representa la situación, los círculos las estaciones o repeticiones y los triángulos los métodos de evaluación de infiltración (3 colores = 3 métodos).

2.2.2 Diseño experimental: El diseño es completamente al azar (CA).

2.3 Métodos elegidos para medir la velocidad de infiltración

Los tres (3) métodos elegidos para la realización de este trabajo, como se mencionó anteriormente en el capítulo I, punto 1.1, pertenecen al grupo de los infiltrómetros y se detallan a continuación.

2.3.1 Anillo simple (Bouwer, 1986): Consiste en un anillo simple de 15 cm de diámetro y 20 cm de alto de material galvanizado (Figura 4). El anillo se clava en el suelo hasta una profundidad de inserción de 5 cm y se aplica el agua dentro del mismo, previamente graduado con una escala 1:1 (regla común adosada al interior del cilindro). Una vez instalado, se hacen lecturas de entrada de agua al suelo cada 5 minutos y a medida que la velocidad de infiltración se va haciendo menor, los intervalos en minutos de las mediciones se alargan, hasta totalizar un período de tiempo en el que la infiltración tiende a estabilizarse. Esta tasa de infiltración corresponde a la velocidad de infiltración o infiltración base.



Figura 4: Anillo simple.

2.3.2 Doble anillo concéntrico (Burt, 1995): Consiste en dos cilindros concéntricos separados (Figura 5), de 50 cm de diámetro el mayor y de 30 cm el menor, usados para determinar la tasa de infiltración, la infiltración acumulada y la conductividad hidráulica saturada. La cuantificación de la infiltración en campo se efectúa clásicamente mediante la medida en el tiempo del descenso de una lámina de agua contenida en anillo central. Cuando la tasa infiltración se vuelve constante, el método asume que se ha alcanzado la velocidad de infiltración para un suelo en particular. Este método minimiza el error asociado con el método de un solo anillo, ya que el flujo lateral del cilindro interno se anula por la carga de agua en el anillo exterior.



Figura 5: Doble anillos concéntricos.

2.3.3 Permeámetro de disco (Perroux y White, 1988): Está diseñado para añadir agua al suelo en un rango de tensiones, que pueden ser establecidas por el operador del instrumento (Figura 6). En este trabajo el ensayo fue a tensión cero, es decir a saturación. Mientras el agua fluye a través del suelo, la columna de agua en el reservorio del permeámetro desciende, permitiendo estimar la velocidad de infiltración a partir de la lectura en intervalos constantes de tiempo en una escala graduada a 0,1 cm, permitiendo lecturas correctas aún a muy bajos caudales. Cuando las velocidades de descenso se estabilizan obteniendo 3 ó 4 valores iguales o con diferencias menores al 5% se termina la medición. Este valor representa la velocidad de infiltración (mm/h). El cilindro mayor se utiliza cuando el terreno es desparejo y debe llenarse con arena fina tamizada para lograr establecer un buen contacto entre disco y suelo (Gil, 2006).



Figura 6: Permeámetro de disco.

2.4 Evaluaciones

Las mediciones de la velocidad de infiltración se llevaron a cabo en triadas constituidas por los tres métodos elegidos. En cada medición se evaluó además, la profundidad del frente de humedecimiento, una vez terminada la misma.

Se extrajeron muestras de suelo y se llevaron a laboratorio para evaluar humedad actual y la obtenida al final del proceso de infiltración correspondiente a distintos espesores del frente de humedecimiento, según el método gravimétrico.

En total se realizaron 18 repeticiones de cada método, es decir 18 estaciones (6 por cada situación de uso). En cada una de estas se realizó una triada de datos como se mencionó en el punto 2.1 de éste capítulo y que de manera más detallada se muestra en la figura 7.



Figura 7: Triada de métodos en una estación.

El procedimiento de medición consistió primeramente en el ordenamiento de los tiempos de medición en una planilla confeccionada para el registro de los datos: fecha, n° de muestra, situación de uso y manejo, tiempo de la lectura, altura de la lámina de agua, profundidad de humedecimiento, entre otros. A modo de ejemplo en la figura 8 puede verse como se organizó la planilla para el método del permeámetro.

PLANILLA DE CAMPO

N°5

PERMEÁMETRO DE DISCO

Fecha 13/09/2013

REPETICIÓN 3

Localidad

Bloque

Establecimiento

Estadio del cultivo

Rotación cultivos

% cobertura.

Frente húmedo:

| TIEMPO | | | INFILTRACION | | |
|----------|---------------|-----------------|---------------|----------------------|--------------------|
| Tiempo A | Tiempo acum B | Lectura reloj C | Enrase (cm) D | Lectura regla (cm) E | Vel. Inf. (mm/h) F |
| 0 | 0 | 0 | | | |
| 5 | 5 | 0:05 | | | |
| 5 | 10 | 0:10 | | | |
| 10 | 20 | 0:20 | | | |
| 10 | 30 | 0:30 | | | |
| 15 | 45 | 0:45 | | | |
| 15 | 60 | 1:00 | | | |
| 20 | 80 | 1:20 | | | |
| 20 | 100 | 1:40 | | | |
| 30 | 130 | 2:10 | | | |
| 30 | 200 | 2:40 | | | |
| 30 | 230 | 3:10 | | | |
| 30 | 260 | 3:40 | | | |

| | | | | | | |
|----------|------------|--|---------------------|--|-----------|--|
| 0 -10 cm | Peso tarro | | Peso lleno (humedo) | | Peso seco | |
| 10-20 cm | Peso tarro | | Peso lleno (humedo) | | Peso seco | |
| 20-30 cm | Peso tarro | | Peso lleno (humedo) | | Peso seco | |

Figura 8: Planilla de campo.

En la parte superior se describen las características generales del tratamiento y luego en:

- ❖ Columna A: Tiempo parcial, en minutos;
- ❖ Columna B: Tiempo acumulado, en minutos;
- ❖ Columna C: El momento de cronómetro en que debía realizarse las lecturas para el método representado en la planilla;
- ❖ Columna D: Lámina de agua al momento de iniciar la lectura, en cm;
- ❖ Columna E: Lectura del permeámetro que marcaba la escala graduada, en cm;
- ❖ Columna F: Velocidad de infiltración (V.I), en milímetros por hora.

El tiempo de inicio de todas las lecturas se tomó siempre en referencia al momento en que el permeámetro de disco comenzaba a burbujear de manera constante, es por ello que en todas las planillas del permeámetro el tiempo de lectura de reloj es 0 (cero). Las planillas del método del simple y doble anillo tienen el comienzo de lectura a los 0:08 y 0:12 minutos de reloj, respectivamente. De esta manera al respetar los tiempos parciales de lectura, tal cual se aprecia en la planilla de campo (primera columna de la izquierda), las mediciones no se superponían y se ahorró tiempo de medición a campo.

La velocidad de infiltración (**V.I**) se calculó de la siguiente manera para los infiltrómetros de cilindro simple y doble.

- **V.I= (Diferencia de lectura regla en mm)*60 min / Tiempo parcial en minutos. [mm/h]**

Y en el caso del permeámetro de disco se calculó como sigue, según Gil (2006):

- **V.I= (Diferencia de lectura regla en mm)*60 min*0,121 / Tiempo parcial en minutos. [mm/h]**

Donde 0,121 es un coeficiente matemático que surge de dividir a la superficie del cilindro del reservorio de agua ($S_r=22,90\text{cm}^2$) por la superficie del cilindro de la capa de arena ($S_{da}=188,70\text{cm}^2$) donde asienta el permeámetro.

Como criterio para los tres métodos, las mediciones finalizaban cuando la lámina infiltrada se hacía constante en al menos dos lecturas consecutivas, es decir, cuando los datos obtenidos de lámina infiltrada en una hora (mm/h) se estabilizaban se llegaba a la **Velocidad de Infiltración base (V.I)**. Una vez obtenida la **velocidad de infiltración base** para el último método en alcanzarla, se extraían del lugar de medición los tres equipos en el mismo tiempo de diferencia con que se comenzaban las lecturas de reloj para cada uno. A modo de ejemplo para explicar esto, si el último método en alcanzar la **V.I** era el **anillo simple**, se sacaba en ese mismo instante el **permeámetro de disco** de su lugar de medición, a los 8 minutos posteriores se retiraba el **simple** y a los 4 minutos de retirado éste último se retiraba el **doble anillo**.

Posteriormente, se esperaba 20 minutos para que finalizara el flujo de agua por efecto gravitacional, para luego proceder a realizar una pequeña calicata en el lugar donde estaban los equipos (Figura 9) y medir así el frente de humedecimiento alcanzado para cada método.

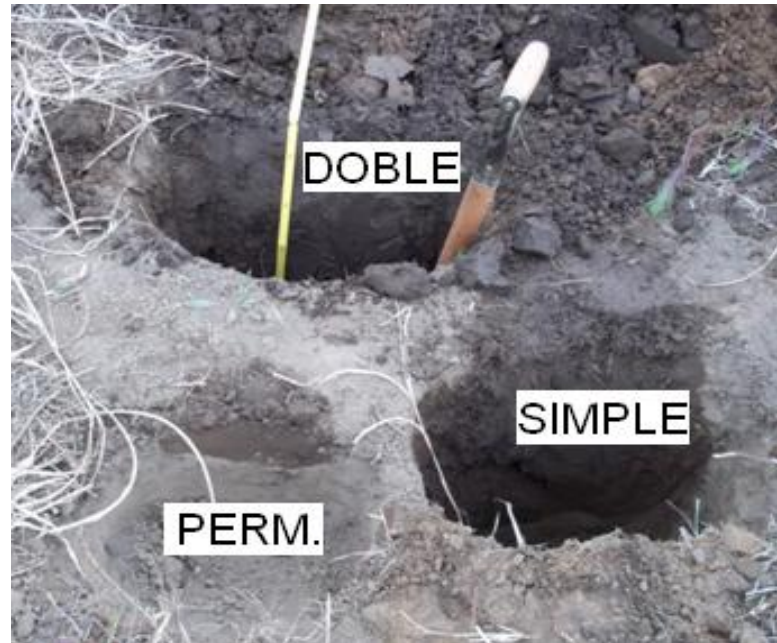


Figura 9: Frente de Humedecimiento

En la planilla de campo (Figura 8), se aprecia al final, una tabla que muestra los intervalos de profundidad en los que se extrajeron las muestras de suelo.

Las muestras para determinar la humedad gravimétrica se extrajeron luego de finalizado el proceso de infiltración y de obtenido los datos del frente de humedecimiento para los tres métodos. Las mismas se llevaron a estufa a 105° hasta peso constante.

2.5 Análisis Estadístico

2.5.1 Análisis Descriptivo

Se realizó en primera instancia para cada uno de los tres métodos, las gráficas del proceso de infiltración en función del tiempo para las tres situaciones de uso y manejo (gráficos 1 al 3), con la finalidad de analizar visualmente el comportamiento de la misma a lo largo del tiempo de medición.

Posteriormente, con el programa Infostat (Di Renzo et al., 2008), menú medidas de resumen, se estimó la media (\bar{X}), el coeficiente de variación (CV), el valor máximo (Máx.) y mínimo (Mín) de la **Velocidad de Infiltración** y del **Frente de Humedecimiento** para cada situación (tablas 1 y 2, respectivamente). También se realizó las gráfica de valores \bar{X} de la **Velocidad de Infiltración** y del **Frente de Humedecimiento** para cada método en las tres situaciones (gráficos 4 a 6).



2.5.2 ANOVA

Para la variable velocidad de infiltración se realizó un ANOVA y en el caso que hubiera diferencias se compararon las medias mediante el programa Infostat (Di Renzo et al., 2008), según test de comparación de medias DGC, para cada situación. Lo mismo se realizó para las variables contenido de agua gravimétrica al inicio de la medición y frente de humedecimiento alcanzado al final de cada medición.

2.5.3 Análisis Correlación

2.5.3.1 Análisis gráfico

Se realizó un diagrama de dispersión para cada par de datos (anillo simple/ doble anillo) y (permeámetro/doble anillo) con el fin de analizar de manera visual el grado en que la nube de puntos se ajustaba a una línea recta (Utts, 2005), sin necesidad de distinguir entre variable dependiente e independiente.

2.5.3.2 Análisis estadístico

Este análisis se realizó con el programa estadístico Infostat (Di Renzo et al., 2008) considerando dos pares de datos de **velocidad de infiltración base (simple anillo/ doble anillo** y con **permeámetro de disco/doble anillo**), tanto para el total de los datos como para cada situación de uso por separado de cada par y así poder analizar la influencia del uso del suelo sobre los resultados obtenidos en la relación entre cada par de datos.

Para éste trabajo se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson (Conover, 1999), para analizar la potencia de la correlación. Los resultados estadísticos arrojados por el programa se presentaron en matrices de 2 columnas y 2 filas. En la posición inferior izquierda se encuentra el **Coefficiente de Correlación de Pearson (CCP)** entre las variables de la lista y en la parte superior derecha la **Probabilidad (p)** asociada a la **prueba de hipótesis** de correlación nula entre las variables de la lista.

- **El CCP** puede tener valores entre -1 y 1. El valor cero indica la ausencia de correlación, 1 correlación perfecta positiva y -1 correlación perfecta negativa.

- **Prueba de hipótesis de Correlación:** Las hipótesis estadísticas a probar para determinar la existencia de correlación fueron:

- ❖ Hipótesis nula (H_0) \Rightarrow No existe correlación entre los resultados obtenidos por las metodologías, es decir que la relación se debe al azar.
- ❖ Hipótesis alternativa (H_1) \Rightarrow Existe correlación entre los resultados obtenidos por las metodologías, por lo que puede ser extrapolada a la población.

Se tomó como criterio rechazar la H_0 y aceptar la H_1 cuando la probabilidad arrojada por el modelo era menor o igual al nivel de significancia del 5% ($\alpha=0,05$) (figura 10).



Figura 10: Zona de Rechazo H_0

2.5.4 Análisis de Regresión lineal

2.5.4.1 Análisis Gráfico

Para el análisis de regresión se trazaron y analizaron las rectas de ajuste obtenidas entre cada par de datos donde hubo evidencia estadísticamente significativa de existencia de relación lineal entre las variables. Además se realizaron diagramas de dispersión entre los datos obtenidos por el doble anillo a campo (datos observados) y los obtenidos por las ecuaciones de ajuste encontradas (datos estimados)

2.5.4.2 Análisis estadístico

Se realizó con el programa estadístico ya mencionado, con el objeto de estudiar la relación funcional entre la variable respuesta o de clasificación Y (Velocidad de Infiltración con el doble anillo) y la variable regresora o predictora X (Velocidad de Infiltración con el anillo simple y permeámetro de disco para el primer y segundo par de datos, respectivamente). Di Renzo et al. (2008) mencionan que esta relación identifica el modelo o función que liga a las variables, estima sus parámetros y contrasta o prueba hipótesis acerca de ellos.

De los resultados arrojados se analizaron el **Coefficiente de Determinación (R^2)**, el **Error Cuadrático Medio de Predicción (ECMP)** y la **Probabilidad (p)** asociada a la prueba de hipótesis de Relación Lineal nula entre las variables de la lista, considerando un nivel de significancia del 5% ($\alpha=0,05$)

- **R^2** : permite evaluar la capacidad predictiva del modelo para replicar los resultados, y la proporción de variación de éstos que pueden explicarse por el modelo de regresión y cuánto debió considerarse como no explicada o residual (Di Renzo et al., 2008).

- **Error Cuadrático Medio de Predicción**: tiene implícita la varianza y el sesgo (Hamilton, 1994). El criterio usado para establecer a un modelo como un predictor adecuado es cuando el valor del **error de predicción** (Di Renzo et al., 2008) está entre el **20 y 25 %**.

Error de predicción: $Y = (ECMP^{1/2} / \bar{X} \text{ valores obs. Doble anillo}) \times 100$.

Donde: Y=valores de Velocidad de Infiltración predichos por el modelo

\bar{X} =media de valores Velocidad de Infiltración observados con el método del doble anillo. Éste parámetro da una idea de la diferencia entre los valores observados y la recta de ajuste obtenida, es decir del error con respecto al modelo hallado.

- **Prueba de hipótesis de Relación Lineal**: Las hipótesis estadísticas a probar para determinar la existencia de relación lineal entre las variables fueron:

- ❖ $H_0 \Rightarrow$ No existe relación LINEAL entre los dos métodos.
- ❖ $H_1 \Rightarrow$ Existe relación LINEAL entre los dos métodos.

2.5.5 Validación de los Supuestos del ANOVA

Para poder crear un modelo de regresión lineal y afirmar si el mismo tiene validez estadística es necesario establecer el cumplimiento de los siguientes supuestos (Motgomery, 2004):

1. Los errores tienen distribución normal
2. Existe homogeneidad de varianzas
3. Independencia de los errores

2.5.5.1 Análisis gráfico

Para validar el supuesto de distribución normal de los errores, se realizó la prueba gráfica Q-Q plot. Mediante esta técnica se obtiene un diagrama de dispersión de los residuos obtenidos versus los cuantiles teóricos de una distribución normal. Si los residuos son normales y no hay otros defectos del modelo, se alinearán sobre una recta a 45°. (Castillo & Lozano, 2007).

Para validar el supuesto de homogeneidad de las varianzas, se realizó un gráfico de dispersión de residuos versus valores predichos. Cuando los errores son homocedásticos, haciendo un gráfico de dispersión de residuos versus valores predichos se debe observar una nube de puntos sin patrón alguno o patrón aleatorio (Castillo y Lozano, 2007).

2.5.5.2 Análisis estadístico

Para determinar si se cumple el primer supuesto sobre los errores se realiza la prueba estadística de Shapiro-Wilks Modificado. En esta prueba se tienen en cuenta los valores residuo de la observación del doble anillo.

Se realiza la prueba estadística de Levene para determinar si se cumple el supuesto de homogeneidad de las varianzas. Esta prueba considera los valores de residuos absolutos.

Para determinar si se cumple el supuesto de independencia de los errores se realiza la prueba estadística Rachas. En esta prueba se tienen en cuenta los valores residuo de la observación doble anillo.

- ❖ Las Hipótesis a probar para validar el primer supuesto fueron:
 - $H_0 \Rightarrow$ los residuos tienen distribución normal.
 - $H_1 \Rightarrow$ los residuos no tienen distribución normal.
- ❖ Las Hipótesis a probar para validar el segundo supuesto fueron:
 - $H_0 \Rightarrow$ Existe homogeneidad de varianzas.
 - $H_1 \Rightarrow$ Al menos dos varianzas son distintas.
- ❖ Las Hipótesis a probar para validar el tercer supuesto fueron:
 - $H_0 \Rightarrow$ Hay independencia de los errores.
 - $H_1 \Rightarrow$ Los errores no son independientes.

Nuevamente se tomó como criterio rechazar la H_0 y aceptar la H_1 cuando la probabilidad de rechazar era menor a un nivel de significancia del 5% ($\alpha=0,05$).

CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis Descriptivo de los datos

Lo primero a considerar fue el comportamiento del proceso de infiltración en cada situación para cada uno de los tres métodos de infiltración empleados (Gráficos 1, 2 y 3). Lo que se observó, es que independientemente del método utilizado, la curva de velocidad de infiltración durante todo el periodo de medición, fue mayor en la situación de mínimo disturbio (S3) respecto a las situaciones de uso restante. Probablemente el hecho de que en ésta situación la velocidad de infiltración haya sido la mayor de todas para los tres infiltrómetros podría asociarse al efecto benéfico de las raíces de gramíneas sobre la estructura y consecuentemente sobre la distribución de los poros, con la acción de la mesofauna presente y a la estabilidad del espacio poroso.

Cuando se observan las curvas de velocidad de infiltración en función del tiempo de las dos situaciones con disturbio antrópico, se ve que, independientemente del método utilizado para medir la infiltración, la situación agrícola pura (S1) tiene las curvas de velocidad de infiltración con valores menores que la situación agrícola-ganadera (S2). Esto probablemente se deba a que en la situación agrícola pura (S1) la circulación de maquinarias agrícolas haya sido más frecuente que en la agrícola-ganadera (S2) pudiendo generar una mayor compactación del suelo y con ello una disminución en la velocidad de infiltración (Soracco 2008).

Respecto a los métodos utilizados para medir la velocidad de infiltración, independientemente de las situaciones de uso y manejo, se puede observar en las mismas gráficas 1, 2 y 3, que con el infiltrómetro de simple anillo los valores de velocidad de infiltración son muy elevados. En contraste con ello, el permeámetro de disco tuvo los menores valores. Los valores medios de velocidad de infiltración, obtenidos a campo, fueron a partir del infiltrómetro de doble anillo concéntrico.

Puede verse que las pendientes de las curvas de infiltración para cada situación de uso y manejo, obtenidas por el método del permeámetro, son más suaves que las obtenidas con los otros dos métodos.

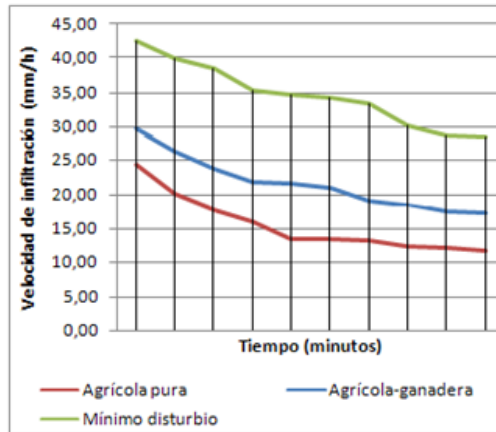


Gráfico 1: Curvas de velocidad de infiltración utilizando el permeámetro de disco para las tres situaciones de uso y manejo.

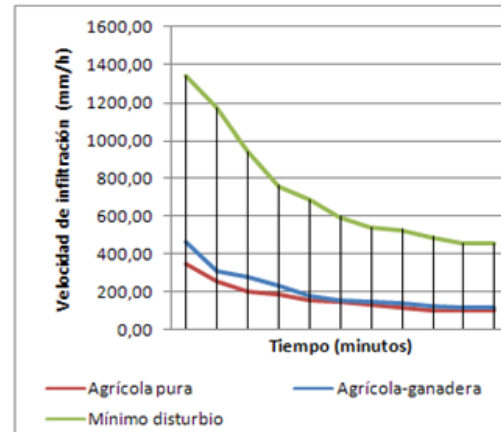


Gráfico 2: Curvas de velocidad de infiltración del utilizando el anillo simple para las tres situaciones de uso y manejo.

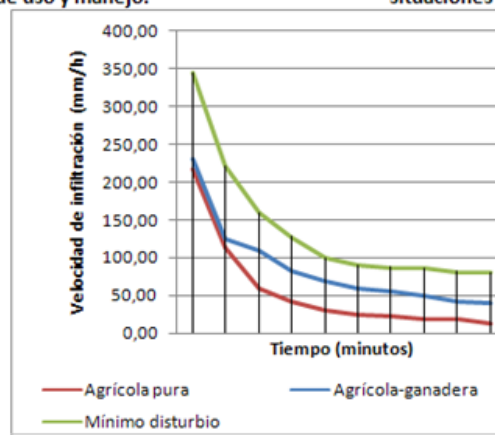


Gráfico 3: Curvas de velocidad de infiltración del utilizando el doble anillo para las tres situaciones de uso y manejo.

En relación a las mediciones de velocidad de infiltración base o simplemente velocidad de infiltración (**V.I**) que se obtuvieron a campo a través de las tres metodologías utilizadas, los valores \bar{X} , CV, valores Máx. y Mín se muestran en la tabla 1. Pudiéndose observar que el método que más variación tuvo fue el del simple anillo, y el de menor variación el permeámetro de disco. El método que arrojó la máxima Velocidad Infiltración (**V.I**) fue el simple anillo, en tanto que el método que arrojó el valor mínimo de fue el del doble anillo con 4 mm/h (tabla 1).

En cuanto a la influencia del uso se puede apreciar que con las tres metodologías evaluadas, la situación 3, mínima alteración, presentó los mayores valores de Velocidad Infiltración, mientras que las situaciones restantes presentaron valores similares. Esto podría estar asociado con diferencias en la condición física del suelo en cada situación de uso y manejo, puesto que en la situaciones con disturbio antrópico (S1 y S2) el suelo estaba muy compactado con una densidad aparente promedio de 1,26 gr suelo/cm³ suelo, mientras que en la de mínimo disturbio la densidad era menor, 1,13 gr/cm³ (Diez, 2006).

Tabla 1: Estadística descriptiva para los métodos de evaluación de velocidad de infiltración, de acuerdo a la situación de uso.

| Método | Situación | n | Min (mm/h) | Máx. (mm/h) | \bar{X} (mm/h) | C.V. |
|-------------|-----------|---|------------|-------------|------------------|------|
| Permeámetro | 1 | 6 | 8,71 | 16,31 | 13,35 | 0,22 |
| | 2 | 6 | 14,16 | 29,52 | 19,30 | 0,29 |
| | 3 | 6 | 25,93 | 50,52 | 34,24 | 0,26 |
| Simple | 1 | 6 | 35,00 | 234,00 | 116,08 | 0,75 |
| | 2 | 6 | 51,00 | 152,00 | 101,83 | 0,38 |
| | 3 | 6 | 159,00 | 852,00 | 460,75 | 0,56 |
| Doble | 1 | 6 | 4,00 | 28,00 | 13,00 | 0,67 |
| | 2 | 6 | 20,00 | 55,00 | 36,25 | 0,35 |
| | 3 | 6 | 24,00 | 136,50 | 81,95 | 0,48 |

Situación 1: agrícola pura; situación 2: agrícola-ganadera; situación 3: mínimo disturbio.

Respecto a la variable frente de humedecimiento alcanzado por las tres metodologías utilizadas, los valores \bar{X} , CV, valores Máx. y Min se muestran en la tabla 2, observándose que el método que más variación tuvo fue el del simple anillo y el de menor variación fue el doble anillo. Los valores medios obtenidos con ambos métodos fueron marcadamente superiores (5 a 7 veces) que los obtenidos con el permeámetro. Al observar estos datos, se advierte que el método que tuvo la máxima profundidad alcanzada por el fue por el doble anillo, con 80 cm, y el valor mínimo de profundidad alcanzada fue por el permeámetro de disco, con 10 cm.

En cuanto a la influencia del uso se puede apreciar que con las tres metodologías evaluadas, la situación 3, mínima alteración, presentó los mayores valores de profundidad alcanzada por el frente de humedecimiento. Esto podría asociarse al mejor estado estructural caracterizado por una menor densidad aparente ($D_{ap}=1,13 \text{ gr/cm}^3$) y una mayor porosidad total ($P_t=57,35\%$), posiblemente asociado a una mayor cantidad de materia orgánica que actúa como agregante y estabilizante del suelo y, por ende, los agregados no se dispersan, aumentando así la infiltración del agua en el suelo. El aumento del espacio poroso grueso y de la estabilidad de los agregados se produce con la incorporación de elementos estabilizantes al suelo y con un incremento de la actividad biológica del mismo (Anderson, 1991).

Tabla 2: Estadística descriptiva para los métodos de evaluación del frente de humedecimiento de acuerdo a la situación de uso.

| Método | Situación | n | Min (cm) | Máx (cm) | \bar{X} (cm) | C.V. |
|-------------|-----------|---|----------|----------|----------------|------|
| Permeámetro | 1 | 6 | 8,00 | 10,00 | 9,33 | 0,09 |
| | 2 | 6 | 9,00 | 14,50 | 10,24 | 0,19 |
| | 3 | 6 | 9,00 | 20,00 | 10,61 | 0,31 |
| Simple | 1 | 6 | 27,00 | 68,00 | 47,08 | 0,41 |
| | 2 | 6 | 47,00 | 65,00 | 52,17 | 0,14 |
| | 3 | 6 | 47,00 | 76,00 | 58,50 | 0,18 |
| Doble | 1 | 6 | 33,00 | 72,00 | 54,25 | 0,32 |
| | 2 | 6 | 57,00 | 67,00 | 60,50 | 0,06 |
| | 3 | 6 | 60,00 | 80,00 | 67,33 | 0,11 |

Siguiendo con el análisis descriptivo de la variable velocidad de infiltración base (**V.I**), se muestra a continuación en los siguientes gráficos comparativos los valores de **V.I** \bar{X} obtenidas a campo de las tres metodologías utilizadas en cada una de las tres situaciones. En la situación 1 (**S1**) se observa que el simple anillo fue el de mayor **V.I** y, casi no hubo diferencias entre el doble y el permeámetro (gráfico 4). Mientras que en las situaciones 2 y 3, se puede ver que el método del simple anillo fue también el de mayor **V.I**, siguiéndole el del doble anillo y por último el del permeámetro de disco (gráfico 5 y 6, respectivamente). Por otro lado, independientemente de la situación analizada, la velocidad de infiltración medida con el infiltrómetro del **anillo simple** fue significativamente superior a la velocidad de infiltración medida a través de las otras dos metodologías. Éste resultado es esperable considerando que en el infiltrómetro del anillo simple el agua se mueve por flujos laterales y verticales, lo que podría incrementar las láminas parciales infiltradas en cada intervalo de tiempo. En el doble anillo, en cambio, el agua contenida en el cilindro externo permite contrarrestar en mayor medida estos flujos laterales. En el caso del permeámetro de disco, el mecanismo del aro de mayor diámetro que el reservorio de agua, relleno de arena, puede contribuir a amortiguar la influencia del flujo lateral en la evaluación de la velocidad de infiltración. También estas diferencias pueden estar relacionadas a que al momento de medición, el suelo presentaba bajo contenido de humedad, por lo que en el caso del simple anillo los flujos laterales pudieron haberse incrementado desigualmente en relación a las otras dos metodologías, respecto a lo observado por Walsh y Mc Dowell (2012), quienes no encontraron diferencias entre los métodos del simple y doble anillo cuando el suelo había sido saturado previo a las mediciones.

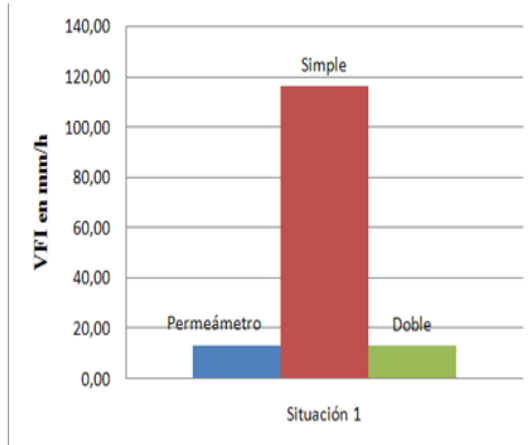


Gráfico 4: Comparación de la velocidad de infiltración final media entre los 3 Métodos para la situación agrícola pura (S1).

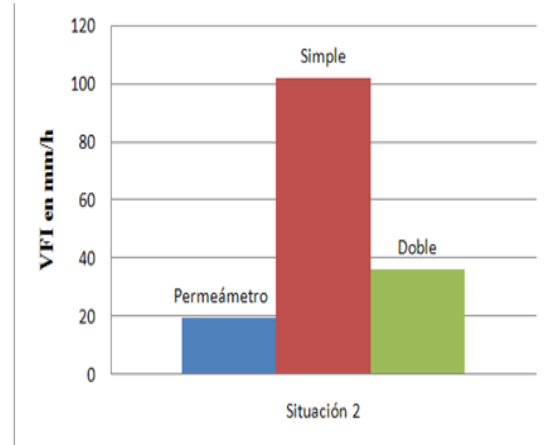


Gráfico 5: Comparación de la velocidad de infiltración final media entre los 3 Métodos para la situación de uso agrícola-ganadera (S2).

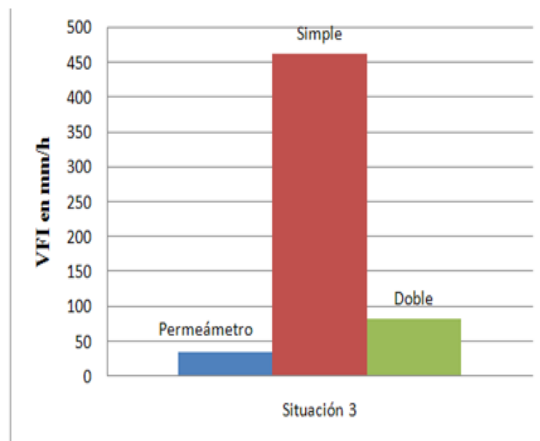


Gráfico 6: Comparación de la velocidad de infiltración final media entre los 3 Métodos para la situación de uso con mínima alteración (S3).

Siguiendo con el análisis gráfico, se muestra a continuación de manera comparativa los valores de frente de humedecimiento \bar{X} obtenidos a campo de las tres metodologías utilizadas en cada una de las tres situaciones. Lo que se puede observar es que en las tres situaciones, el doble anillo fue el que mayor profundidad alcanzó el frente de humedecimiento y, el de menor profundidad alcanzada lo tuvo el método del permeámetro (gráficos 7, 8 y 9, respectivamente). Por lo que se puede aseverar que de los tres métodos, independientemente de la situación de uso y manejo, el que mayor profundidad del frente de humedecimiento alcanzó fue el del doble anillo por lo mencionado en el párrafo anterior.

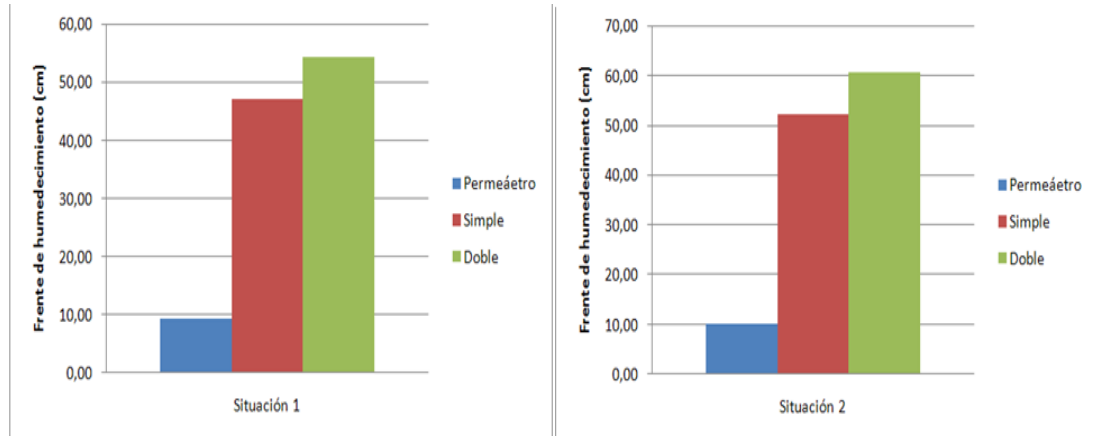


Gráfico 7: Comparación del frente de humedecimiento media entre los 3 Métodos para la situación agrícola pura (S1).

Gráfico 8: Comparación del frente de humedecimiento media 3 Métodos para la situación de uso agrícola-ganadera (S2).

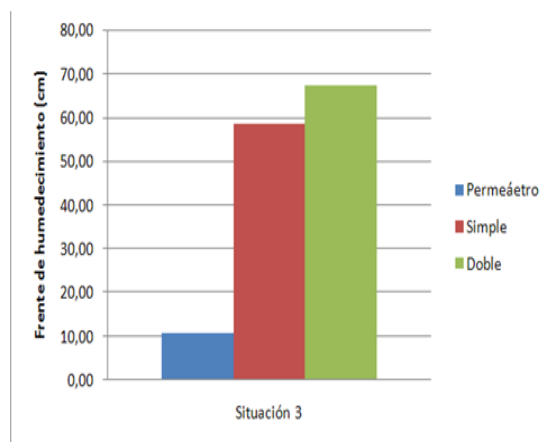


Gráfico 9: Comparación del frente de humedecimiento media 3 Métodos para la situación de uso con mínima alteración (S3).

3.2 ANOVA

Siguiendo el análisis de la variable velocidad de infiltración, se muestra en la tabla 3 los resultados obtenidos de realizar un ANOVA y la comparación de medias según test DGC entre métodos de medición para cada situación, con la finalidad de saber si hubo efecto del uso y manejo sobre los resultados obtenidos a campo. Al observar dicha tabla, se observa que hubo evidencia estadísticamente significativa ($p < 0,05$) del efecto del uso y manejo (situaciones) sobre los resultados obtenidos. La situación de mínima alteración (S3) fue la que se diferenció estadísticamente de las otras dos situaciones para los tres métodos. Esto, probablemente, como ya se mencionó, a que en ésta situación el suelo presenta una condición física caracterizada por una densidad aparente menor ($Dap = 1,13 \text{ gr suelo/cm}^3$ suelo) y una porosidad total mayor ($Pt = 57,35 \%$) que en las otras dos situaciones con alteración antrópica en la que la Dap promedio fue de $1,26 \text{ gr suelo/cm}^3$ suelo y la Pt de $52,45\%$ en el mismo espesor.

Tabla 3: Síntesis de resultados obtenidos del ANOVA y comparación de media DGC para la variable velocidad de infiltración para cada situación.

| Método | Situación | n | V.I \bar{X} (mm/h) | probabilidad (p) efecto de la situación | Nivel de Significancia (α) | DGC |
|-------------|------------------------|---|-------------------------|---|--|-----|
| Permeámetro | Agrícola pura (S1) | 6 | 13,35 | 0,0004 | $\alpha = 0,05$ | A |
| | Agrícola-ganadera (S2) | 6 | 19,30 | | | A |
| | Mínima alteración (S3) | 6 | 34,24 | | | B |
| Simple | Agrícola pura (S1) | 6 | 116,08 | 0,0013 | $\alpha = 0,05$ | A |
| | Agrícola-ganadera (S2) | 6 | 101,83 | | | A |
| | Mínima alteración (S3) | 6 | 460,75 | | | B |
| Doble | Agrícola pura (S1) | 6 | 13,00 | 0,0004 | $\alpha = 0,05$ | A |
| | Agrícola-ganadera (S2) | 6 | 36,25 | | | A |
| | Mínima alteración (S3) | 6 | 81,95 | | | B |

Letras distintas para cada método de medición indican diferencias significativas entre situaciones de uso, según test DGC ($p \leq 0,05$).

En la tabla que sigue (tabla 4), se muestran los resultados obtenidos de realizar un ANOVA para la variable contenido de agua al inicio de la toma de cada medición, con la finalidad de saber si hubo efecto de ésta variable sobre los resultados obtenidos a campo. La misma muestra de manera resumida los valores arrojados por el programa estadístico mencionado para la variable contenido de humedad al inicio de cada medición para las distintas profundidades de medición y situaciones de uso y manejo. Se puede observar que el contenido de agua al inicio fue estadísticamente menor en la situación de mínimo disturbio respecto a las otras dos para las tres profundidades de muestreo. En las situaciones con alteración antrópica (S1 y S2) el programa arrojó que no hubo diferencias entre sí respecto al contenido de agua inicial. Ésta diferencia significativa entre la situación de mínimo disturbio respecto a las dos situaciones con alteración antrópica, probablemente sea debido a que había especies vegetales invierno-primaverales que estaban presentes y verdes extrayendo agua edáfica que había en ese momento. Las otras dos situaciones en cambio, se encontraban con un barbecho libre de malezas. Estas diferencias en el contenido de humedad pueden haber influido también en los resultados observados durante el proceso de infiltración a lo largo del tiempo de medición discutidos precedentemente, ya que existe una relación inversa entre la infiltración y contenido de agua del suelo (Iriarte et, al., 2000).

Tabla 4: Síntesis de resultados del ANOVA para la variable humedad al inicio de cada medición para cada situación.

| Profundidad (cm) | Situación | n | Contenido humedad gravimétrica (%) | Probabilidad (p-valor) | Nivel de significancia (α) | DGC |
|------------------|------------------------|---|------------------------------------|------------------------|-------------------------------------|-----|
| 0-10 | Agrícola pura (S1) | 6 | 6,22 | 0,0015 | $\alpha = 0,05$ | B |
| | Agrícola-ganadera (S2) | 6 | 6,05 | | $\alpha = 0,05$ | B |
| | Mínima alteración (S3) | 6 | 5,03 | | $\alpha = 0,05$ | A |
| 10-20 | Agrícola pura (S1) | 6 | 9,30 | 0,0035 | $\alpha = 0,05$ | B |
| | Agrícola-ganadera (S2) | 6 | 8,91 | | $\alpha = 0,05$ | B |
| | Mínima alteración (S3) | 6 | 7,31 | | $\alpha = 0,05$ | A |
| 20-30 | Agrícola pura (S1) | 6 | 10,53 | 0,0011 | $\alpha = 0,05$ | B |
| | Agrícola-ganadera (S2) | 6 | 10,10 | | $\alpha = 0,05$ | B |
| | Mínima alteración (S3) | 6 | 8,37 | | $\alpha = 0,05$ | A |

Letras distintas para cada profundidad de medición indican que no hubo diferencias significativas entre ellas, según test DGC ($p \leq 0,05$).

Se muestran en la tabla 5, detallada a continuación, los resultados obtenidos de realizar un ANOVA para la variable profundidad del frente de humedecimiento alcanzado por cada uno de los métodos al finalizar cada medición para las tres situaciones de uso y manejo. Al observar dicha tabla, se puede ver que no hubo evidencia estadísticamente significativa ($p < 0,05$) del efecto del uso y manejo (situaciones) sobre la profundidad alcanzada para cada método.

Tabla 5: Síntesis de resultados obtenidos del ANOVA y comparación de media DGC para la variable frente de humedecimiento alcanzado para cada situación.

| Método | Situación | n | Prof. X (cm) | probabilidad (p) efecto de la situación | Nivel de Significancia (α) | DGC |
|-------------|------------------------|---|--------------|---|-------------------------------------|-----|
| Permeámetro | Agrícola pura (S1) | 6 | 9,33 | 0,0969 | $\alpha = 0,05$ | A |
| | Agrícola-ganadera (S2) | 6 | 10,92 | | | A |
| | Mínima alteración (S3) | 6 | 12,83 | | | A |
| Simple | Agrícola pura (S1) | 6 | 47,08 | 0,3401 | $\alpha = 0,05$ | A |
| | Agrícola-ganadera (S2) | 6 | 52,17 | | | A |
| | Mínima alteración (S3) | 6 | 58,50 | | | A |
| Doble | Agrícola pura (S1) | 6 | 54,25 | 0,1285 | $\alpha = 0,05$ | A |
| | Agrícola-ganadera (S2) | 6 | 60,50 | | | A |
| | Mínima alteración (S3) | 6 | 67,33 | | | A |

Letras distintas para cada método de medición indican diferencias significativas entre situaciones de uso, según test DGC ($p \leq 0,05$).

3.3 Análisis de correlación

Éste análisis indicó la fuerza y la dirección de la relación lineal y proporcionalidad entre las dos variables estadísticas analizadas en cada par de datos. Se consideró que dos variables cuantitativas estaban correlacionadas cuando los valores de una de ellas variaban sistemáticamente con respecto a los valores homónimos de la otra (Kenney, 1951).

3.3.1 Análisis gráfico

Como primer paso en el análisis de correlación, las gráficas entre el total de datos y los correspondientes a cada situación de uso para los dos pares de datos estudiados (gráficos 10 al 17) demostraron que solo hubo relación cuando se consideró el total de datos y los correspondientes a la situación agrícola pura (S1) para el primer par de datos (doble anillo/anillo simple) (gráficos 10 y 11) y en el caso del segundo par de datos (doble anillo/permeámetro) se evidenció relación cuando se consideró el total de datos y la situación agrícola-ganadera (S2) (gráficos 14 y 13).

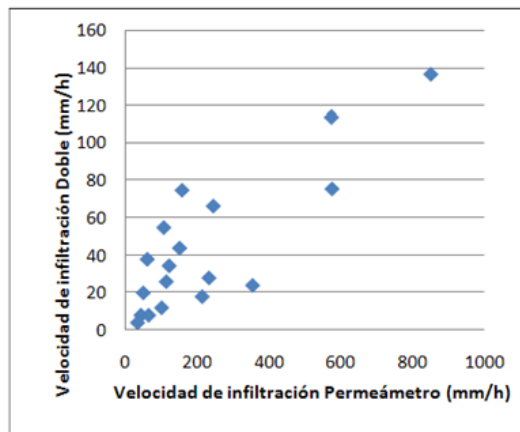


Gráfico 10: Nube de puntos de la relación anillo simple vs el doble anillo para el total de muestras del primer par de datos (18 datos).

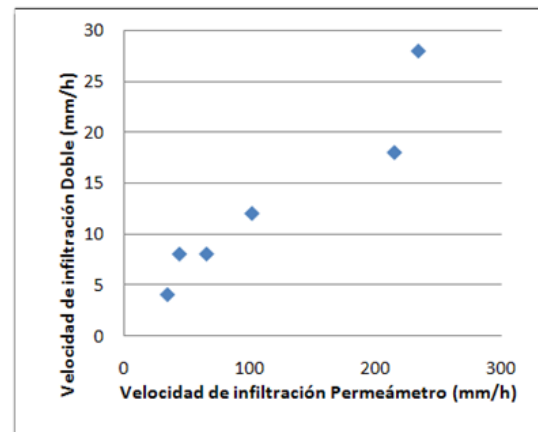


Gráfico 11: Nube de puntos de la relación anillo simple vs el doble anillo para la situación 1 del primer par de datos (6 datos).

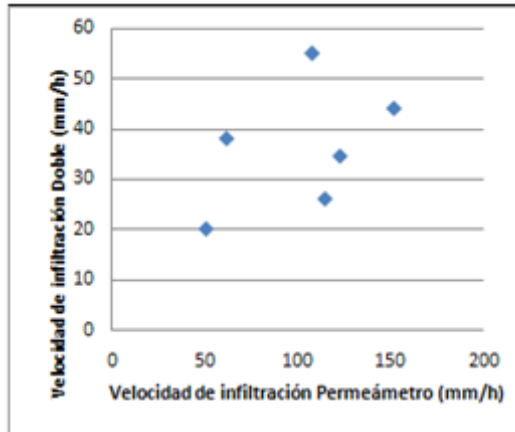


Gráfico 12: Nube de puntos de la relación anillo simple vs el doble anillo para la situación 2 del primer par de datos (6 datos).

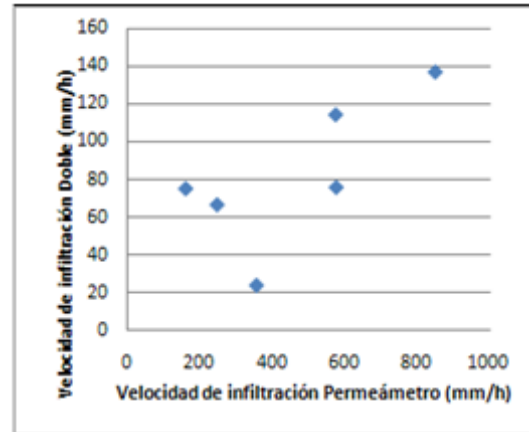


Gráfico 13: Nube de puntos de la relación anillo simple vs el doble anillo para la situación 3 del primer par de datos (6 datos).

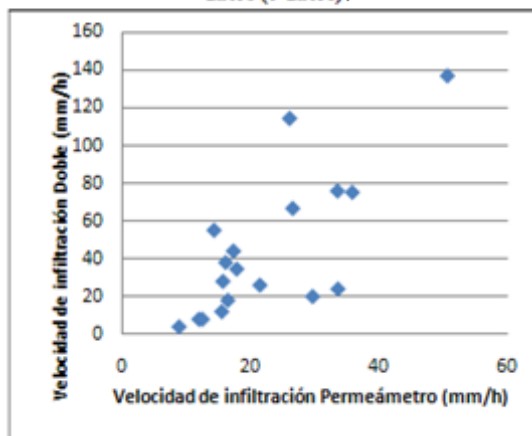


Gráfico 14: Nube de puntos de la relación permeámetro vs el doble anillo para el total de muestras del segundo par de datos (18 datos).

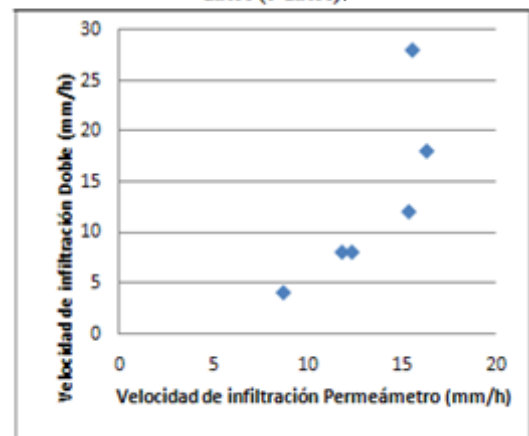


Gráfico 15: Nube de puntos de la relación permeámetro vs el doble anillo para la situación 1 del segundo par de datos (6 datos).

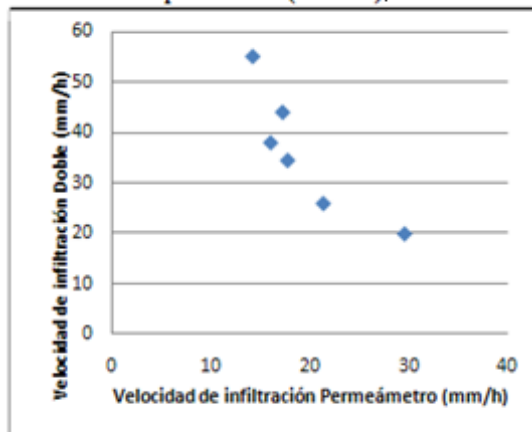


Gráfico 16: Nube de puntos de la relación permeámetro vs el doble anillo para la situación 2 del segundo par de datos (6 datos).

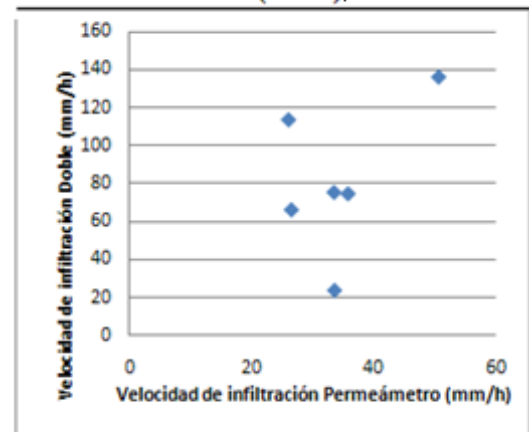


Gráfico 17: Nube de puntos de la relación permeámetro vs el doble anillo para la situación 3 del segundo par de datos (6 datos).

3.3.2 Análisis estadístico

Como ya se mencionó en el punto 2.5.3.2, se realizó el análisis del **CCP** con el programa Infostat (Di Renzo et al., 2008). Los resultados obtenidos del análisis del primer par de datos (simple anillo/doble anillos concéntricos) se sintetizaron en la Tabla 6 y los obtenidos del segundo par de datos (permeámetro de disco/doble anillo) en la Tabla 7.

De la observación de los resultados expuestos para el primer par de datos (tabla 6), se vio que hubo evidencia estadísticamente significativa ($p=1,4E^{-05}$ y $p=4,0E^{-03}$) y CCP (0,84 y 0,95) de existencia de correlación positiva entre los métodos del infiltrómetro del simple y doble anillo concéntrico para el total de datos y para la situación agrícola pura (S1), respectivamente. Se observa para este primer par, que en la situaciones 2 y 3, a pesar de presentar un coeficiente de correlación de 0,45 y 0,71, respectivamente, no hubo evidencia estadísticamente significativa ($p > 0,05$) de existencia de correlación entre los métodos que conformaron este primer par de datos, es decir que las relaciones existentes entre estos datos pueden ser debidas al azar.

Tabla 6: Síntesis de resultados del análisis de correlación entre los métodos del simple y doble anillo (primer par).

| Relación | n | Coefficiente Correlación de Pearson (CCP) | Probabilidad (p) | Nivel de Significancia (α) |
|---|----|---|------------------|-------------------------------------|
| Anillo Simple/Anillo Doble total de datos | 18 | 0,84 | $1,4 E^{-05}$ | $\alpha =0,05$ |
| Anillo Simple/Anillo Doble S1 | 6 | 0,95 | $4,0 E^{-03}$ | $\alpha =0,05$ |
| Anillo Simple/Anillo Doble S2 | 6 | 0,45 | 0,37 | $\alpha =0,05$ |
| Anillo Simple/Anillo Doble S3 | 6 | 0,71 | 0,11 | $\alpha =0,05$ |

Los resultados expuestos para el segundo par de datos (tabla 7), demuestran que hubo evidencia estadísticamente significativa ($p=3,9 E^{-04}$) y CCP (0,75) de existencia de correlación positiva entre los métodos del permeámetro de disco y doble anillo concéntrico, para el total de muestras de dicho par. También hubo evidencia estadísticamente significativa ($p=0,02$) y CCP (-0,87) de existencia de correlación negativa entre los métodos del permeámetro de disco y doble anillo concéntrico (segundo par), para la situación agrícola-ganadera (S2). Del análisis particionado por situaciones de uso se observó para éste par de datos, que a pesar de presentar un coeficiente de correlación de 0,79 y 0,45 para las situaciones 1 y 3, respectivamente, no hubo evidencia estadísticamente significativa ($p>0,05$)

de existencia de correlación entre los métodos que conformaron este segundo par de datos, es decir que estas relaciones pueden ser debidas al azar.

Tabla 7: Síntesis de resultados del análisis de correlación entre los métodos del permeámetro y doble anillo (segundo par).

| Relación | n | Coefficiente Correlación de Pearson (CCP) | Probabilidad (p) | Nivel de Significancia (α) |
|---|----|---|----------------------|-------------------------------------|
| Permeámetro/Anillo Doble total de datos | 18 | 0,75 | 3,9 E ⁻⁰⁴ | $\alpha = 0,05$ |
| Permeámetro /Anillo Doble S1 | 6 | 0,79 | 0,06 | $\alpha = 0,05$ |
| Permeámetro /Anillo Doble S2 | 6 | -0,87 | 0,02 | $\alpha = 0,05$ |
| Permeámetro /Anillo Doble S3 | 6 | 0,45 | 0,37 | $\alpha = 0,05$ |

3.4 Análisis de regresión lineal

El objetivo de este análisis fue determinar una función matemática sencilla que describiera el comportamiento de una variable dado los valores de otra (Porras, 2002), válido para cada par de datos en los casos donde hubo evidencia estadísticamente significativa de correlación entre la variables regresoras (V.I del simple anillo y permeámetro) y la variable dependiente (V.I doble anillo), es decir, $Y = a + b * X$, donde: Y = velocidad de infiltración base estimada del doble anillo, a = ordenada al origen cuando X es igual a cero, b = pendiente de recta de regresión lineal y X = velocidad de infiltración base observada a campo por el método del simple anillo o permeámetro de disco.

3.4.1 Análisis Gráfico

En el análisis de regresión lineal, las gráficas del primer y segundo par de datos donde hubo evidencia estadísticamente significativa de correlación, mostraron una nube dispersa a lo largo de una línea indicando el grado de ajuste de los datos obtenidos a campo (gráficos 18 al 21). Para el primer par (anillo simple/ doble anillo concéntrico) se observó que la nube de puntos existente por encima y de bajo de la recta de ajuste para el total de datos analizados tuvo una distribución algo más dispersa con valores más extremos que en la situación agrícola pura (S1). Por otro lado, al analizar el segundo par de datos (permeámetro de disco/ doble anillo concéntrico) se observó que la nube de puntos dispersa por encima y por debajo de la recta de ajuste para el total de datos analizados tuvo una distribución a lo

largo de la línea de ajuste con valores más extremos por encima y por debajo de la misma, que para el caso de la situación agrícola- ganadera (S2).

Al analizar la tendencia de la nube de puntos, se observa que para el primer par de datos (anillo simple /doble anillo), tanto para el total de datos como para la situación agrícola pura (S1) la relación sigue un comportamiento lineal positivo. Sin embargo al analizar la tendencia de ajuste para el segundo par se observó que para la situación agrícola-ganadera (S2), la tendencia fue negativa y bien marcada.

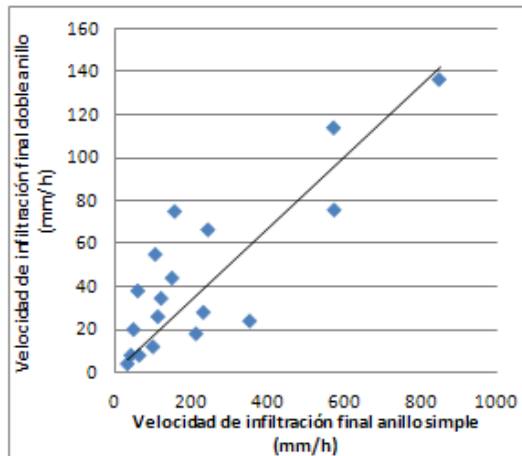


Gráfico 18: Nube de puntos de la relación simple anillo vs el doble para el total de muestras del primer par de datos (18 datos).

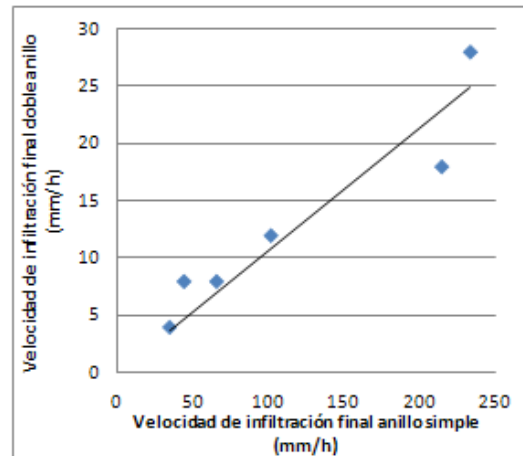


Gráfico 19: Nube de puntos de la relación simple anillo vs el doble para la situación 1 del primer par de datos (6 datos).

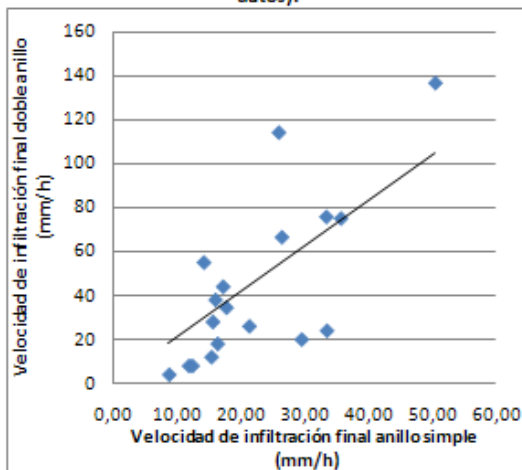


Gráfico 20: Nube de puntos de la relación permeámetro de disco vs el doble anillo para el total de muestras del segundo par de datos (18 datos).

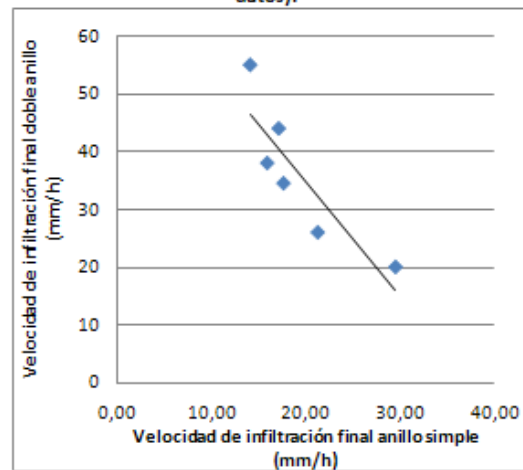


Gráfico 21: Nube de puntos de la relación permeámetro de disco vs el doble para la situación 2 del segundo par de datos (6 datos).

Siguiendo con el análisis, se procedió a realizar los gráficos de valores estimados de V.I del doble anillo vs los observados a campo para los cuatro casos que se vienen analizando (para el primer par de datos con el total de muestras y para la situación agrícola pura (S1) (gráficos 22 y 23) y, para el segundo par para el total de los datos y situación agrícola-ganadera (S2) (gráficos 24 y 25), respectivamente). Los datos estimados son el

resultado de aplicar las ecuaciones de regresión encontradas para los cuatro casos, con los datos correspondientes de las variables predictoras que intervienen en cada una.

Se pudo observar que los valores, estimados en el primer par (anillo simple/doble anillo) para el total de datos, se ajustan parcialmente a los valores observados, es por ello que la nube de puntos aparece dispersa (gráfico 22). Mientras que para el segundo par (permeámetro/doble anillo) para el total de datos, los valores esperados tienen un menor ajuste si se compara con el total de muestras del primer par, observándose que la dispersión de los puntos en éste segundo par está más disperso respecto a la recta de ajuste (gráfico 24). Por otro lado al analizar la situación agrícola pura (S1) para el primer par de datos, la dispersión de los puntos respecto a la recta, muestran un mejor ajuste que para el primer par (simple/doble) para total de datos (gráfico 23). Mientras que para el segundo par (permeámetro/doble) se observa que la situación agrícola-ganadera (S2) tuvo un mejor ajuste que para el total de datos analizados de éste segundo par, observándose que la dispersión de los puntos en la situación 2 (S2) está menos dispersa respecto a la recta de ajuste (gráfico 25).

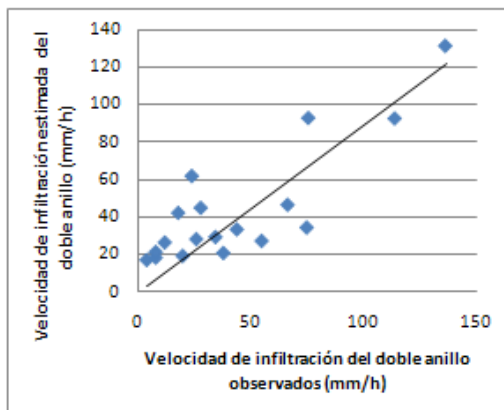


Gráfico 22: Nube de puntos datos observados vs. estimados del doble anillo para el total de muestras del primer par de datos (18 datos).

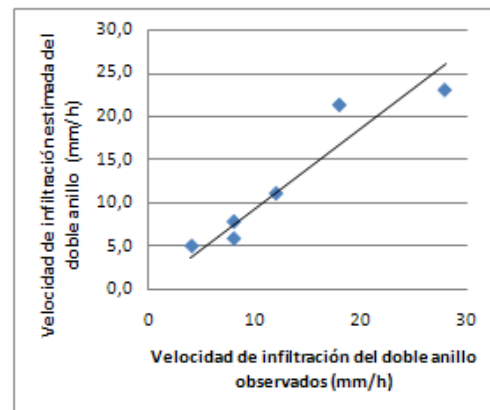


Gráfico 23: Nube de puntos datos observados vs. estimados del doble anillo para la situación agrícola pura (S1) del primer par de datos (6 datos).

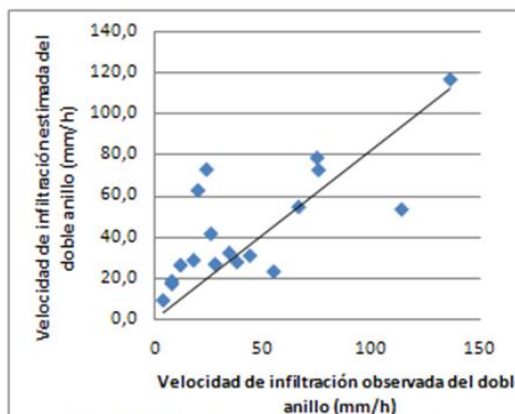


Gráfico 24: Nube de puntos datos observados vs. estimados del doble anillo para el total de muestras del segundo par de datos (18 datos).

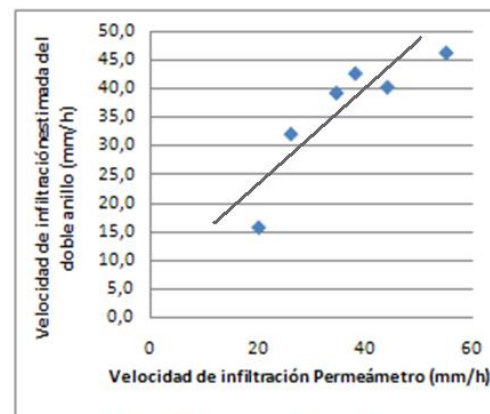


Gráfico 25: Nube de puntos datos observados vs. estimados del doble anillo para la situación agrícola-ganadera (S2) del segundo par de datos (6 datos).

3.4.2 Análisis Estadístico

Lo primero a destacar de éste análisis es el estadístico R^2 , el cual fue alto, con valores de 70% y 90% en el caso del primer par (anillo simple/doble anillo) para el total de datos y para la situación agrícola pura (S1), respectivamente. Para el segundo par de datos (Permeámetro/Doble anillo) fue alto, con un valor del 76% para la situación agrícola-ganadera (S2), mientras que para el total de muestras el valor fue bajo (56%). Estos valores de R^2 indican que un 70%, 90%, 56% y 76% de las variaciones observadas en la velocidad de infiltración con el doble anillo pueden ser explicadas por las variaciones en la velocidad de infiltración medidas con el anillo simple considerando la totalidad de los datos y los de la situación agrícola pura (S1), y la totalidad de los datos y de la situación agrícola-ganadera (S2) obtenidas con el permeámetro de disco, respectivamente (Tabla 8). En segundo lugar es necesario considerar el análisis del estadístico **p-valor del modelo**, el cual arrojó que hubo evidencia estadísticamente significativa (p -valor modelo $< 0,05$) de existencia de relación lineal para el primer y el segundo par para los cuatro casos mencionados en el párrafo anterior (Tabla 8).

A partir de los coeficientes arrojados por el análisis (constante (a) y pendiente (b)) se pudieron construir para estos cuatro casos, las ecuaciones de relación donde la variable respuesta (V.I doble) es explicada por la variable predictora (V.I Simple y V.I permeámetro), observándose en la tabla 8, la ecuación correspondiente a cada caso. Al analizar dichas ecuaciones de ajuste, se vio que para el segundo par de datos para el total de muestras la ordenada al origen (a) es negativa (-13,60), lo que estaría indicando que cuando la velocidad de infiltración obtenida por el permeámetro es de 1 mm/h, los mm infiltrados por el doble anillo serían -11,03 mm/h. Esto último no tiene sentido físico, puesto que el suelo tiene una capacidad de infiltración que por mínima que sea supera o iguala el valor de 0 mm/h, por ello ésta ecuación de ajuste encontrada se descartó. En cuanto a los tres casos restantes (anillo simple/doble para el total de datos, simple/doble para la situación 1 y permeámetro/doble para la situación 2) las ordenadas al origen son positivas. En estos tres últimos casos, se observó que el valor porcentual obtenido del **error de predicción** en todas ellas fue superior al valor de referencia del **20-25%** (Tabla 8). Por lo tanto ninguna de estas tres ecuaciones restantes obtenidas puede considerarse lo suficientemente confiable para estimar valores de velocidad de infiltración con el método de doble anillo concéntrico a partir de los resultados obtenidos a campo con los métodos de infiltración de anillo simple y permeámetro de disco, indicando que existen otras variables que inciden en la relación estudiada, como puede ser el contenido de humedad y las variaciones en la densidad aparente

(Dap) del suelo, así como también aspectos relacionados a la metodológico como diferencias en los dispositivos de medición, n° de repeticiones, entre otros.

El análisis de regresión arrojó los siguientes resultados estadísticos (Tabla 8).

Tabla 8: Tabla resumen de los resultados obtenidos del análisis de regresión lineal para el primer y segundo par de datos en los casos donde hubo evidencia estadísticamente significativa de correlación entre las variables.

| Relación | n | R ² | p- valor modelo | Ctte (a) | Pendiente (b) | Ecuación de Regresión | ECMP | Error Predicc. $y=(\sqrt{ECMP})+\bar{x}$ | Nivel de significancia (α) |
|--|----|----------------|-----------------|----------|---------------|------------------------|--------|--|----------------------------|
| Anillo Simple /Anillo Doble Total de datos | 18 | 0,70 | <0,0001 | 12,45 | 0,14 | $Y= 12,45 + 0,14*X$ | 530,24 | 53% | α =0,05 |
| Anillo Simple /Anillo Doble Situación 1 | 6 | 0,90 | 0,004 | 1,98 | 0,09 | $Y= 1,98 + 0,09*X$ | 33,71 | 45% | α =0,05 |
| Permeámetro /Anillo Doble Total de datos | 18 | 0,56 | 0,0004 | -13,6 | 2,57 | $Y= (-13,60) + 2,57*X$ | 838,58 | 66% | α =0,05 |
| Permeámetro /Anillo Doble Situación 2 | 6 | 0,76 | 0,0238 | 74,39 | -1,98 | $Y= 74,39 + (-1,98)*X$ | 258,88 | 44% | α =0,05 |

3.5 Validación de los Supuestos del ANOVA

3.5.1 Análisis grafico

3.5.1.1 Normalidad de la distribución de los errores

Con el programa estadístico Infostat se realizó, para cada uno de los cuatro casos en donde hubo evidencia estadísticamente significativa de existencia de relación lineal entre las variables intervinientes, una prueba gráfica Q-Q plot para determinar de manera visual si se cumple con el supuesto de distribución normal de los errores para el primer par en el total de datos y en la situación 1 (gráficos 26 y 27, respectivamente) y para el segundo par para el total de muestras y en la situación 2, respectivamente (gráficos 28 al 29, respectivamente).

Puede verse que en todos los casos la nube de puntos se ajusta a la línea recta de 45°, por lo que puede decirse que se cumple éste primer supuesto para los cuatro casos analizados.

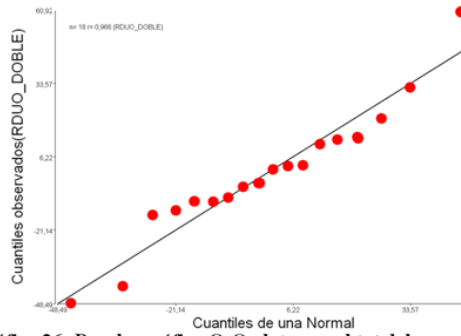


Gráfico 26: Prueba gráfica Q-Q plot para el total de muestras (18 datos) del primer par.

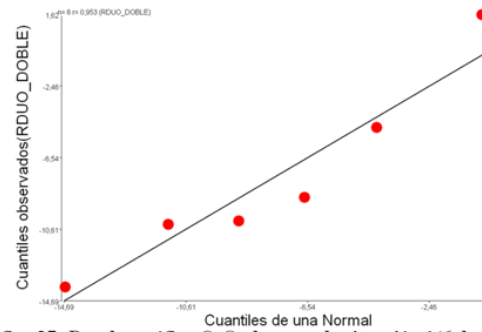


Gráfico 27: Prueba gráfica Q-Q plot para la situación 1 (6 datos) del primer par.

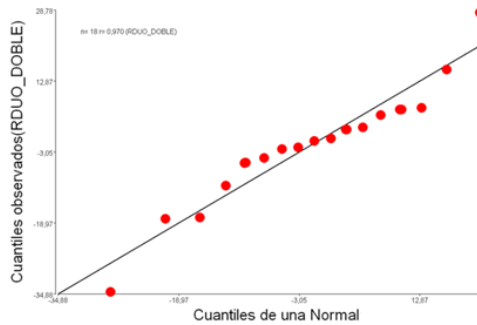


Gráfico 28: Prueba gráfica Q-Q plot para el total de muestras (18 datos) del segundo par de datos.

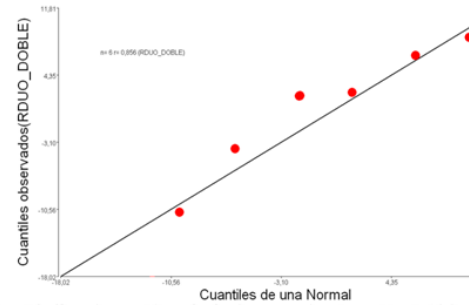


Gráfico 29: Prueba gráfica Q-Q plot para la situación 2 (6 datos) del primer par de datos.

3.5.1.2 Homogeneidad de las varianzas

Utilizando el programa estadístico ya mencionado, se realizó, para cada uno de los cuatro casos en donde hubo evidencia estadísticamente significativa de existencia de relación lineal entre las variables intervinientes, un gráfico de dispersión de residuos versus valores predichos (gráficos 30 al 33).

Se puede observar que la nube de puntos en los cuatro gráficos no tiene un patrón definido, es decir el patrón de distribución es aleatorio para los cuatro casos. Por lo que a simple vista se puede decir que los errores son homocedásticos, es decir que las varianzas son homogéneas.

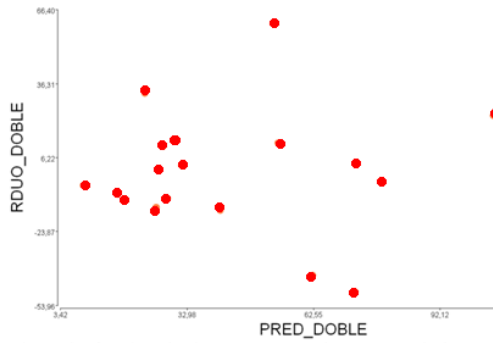


Gráfico 30: Gráfico de dispersión residuo vs. predichos para el total de muestras (18 datos) del primer par de datos.

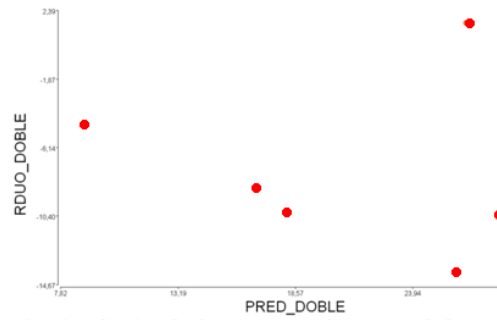


Gráfico 31: Gráfico de dispersión residuo vs. predichos para la situación 1 (6 datos) del primer par de datos.

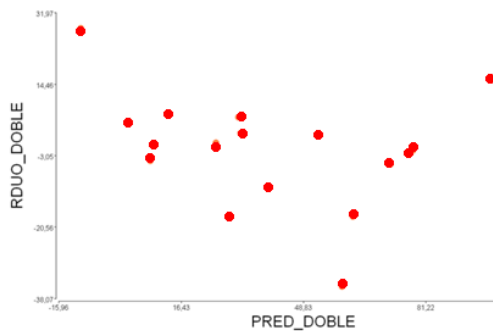


Gráfico 32: Gráfico de dispersión residuo vs. predichos para el total de muestras (18 datos) del segundo par de datos.

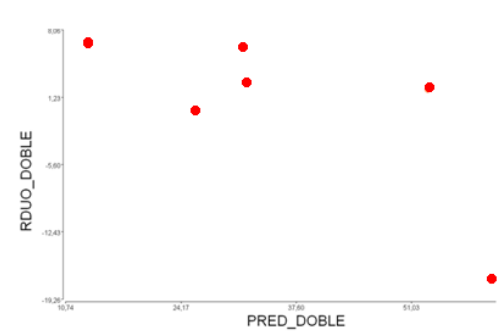


Gráfico 33: Gráfico de dispersión residuo vs. predichos para la situación 2 (6 datos) del segundo par de datos.

3.5.2 Análisis estadístico

3.5.2.1 Normalidad de la distribución de los errores

A continuación se expone en una tabla resumen los datos arrojados por el programa. Los datos siguieron una distribución normal (p (unilateral D) > 0,05). Se acepta la hipótesis nula, se cumple éste supuesto para todos los casos (Tabla 9).

Tabla 9: Prueba Shapiro Wilks (Modificado)

| Relación | Variable | n | p (unilateral D) | Nivel de significancia (α) |
|---|---------------|----|------------------|-------------------------------------|
| Anillo Simple/Anillo Doble total de datos | RESIDUO DOBLE | 18 | 0,8570 | $\alpha = 0,05$ |
| Anillo Simple/Anillo Situación 1 | RESIDUO DOBLE | 6 | 0,3370 | $\alpha = 0,05$ |
| Permeámetro/Anillo Doble total de datos | RESIDUO DOBLE | 18 | 0,8022 | $\alpha = 0,05$ |
| Permeámetro/Anillo Doble Situación 2 | RESIDUO DOBLE | 6 | 0,8293 | $\alpha = 0,05$ |

3.5.2.2 Homogeneidad de las varianzas

Los resultados se expresaron en una tabla resumen (Tabla 10) para los cuatro casos. Las varianzas fueron homogéneas (p -valor modelo $> 0,05$). Se acepta la hipótesis nula, se cumple el supuesto para todos los casos caso (Tabla 10).

Tabla 10: Prueba de Levene

| Relación | Variable | n | p-valor modelo | Nivel de significancia (α) |
|---|--------------------------|----|----------------|-------------------------------------|
| Anillo Simple/Anillo Doble total de datos | RESIDUOS ABSOLUTOS DOBLE | 18 | 0,0264 | $\alpha = 0,05$ |
| Anillo Simple/Anillo Situación 1 | RESIDUOS ABSOLUTOS DOBLE | 6 | 0,1645 | $\alpha = 0,05$ |
| Permeámetro/Anillo Doble total de datos | RESIDUOS ABSOLUTOS DOBLE | 18 | 0,0264 | $\alpha = 0,05$ |
| Permeámetro/Anillo Doble Situación 2 | RESIDUOS ABSOLUTOS DOBLE | 6 | 0,1645 | $\alpha = 0,05$ |

3.5.2.3 Independencia de los errores

Los resultados se expresaron en una tabla resumen (Tabla 11) para los cuatro casos. Hubo independencia de los errores ($p > 0,05$). Se acepta la hipótesis nula, se cumple éste supuesto para todos los casos caso (Tabla 11).

Tabla 11: Prueba de Rachas

| Situación | Variable | n | p (2 colas) | Nivel de significancia (α) |
|------------------------|---------------|---|-------------|-------------------------------------|
| Agrícola pura (S1) | RESIDUO DOBLE | 6 | 0,4000 | $\alpha = 0,05$ |
| Agrícola-ganadera (S2) | RESIDUO DOBLE | 6 | 0,1333 | $\alpha = 0,05$ |
| Mínimo disturbio | RESIDUO DOBLE | 6 | 0,9000 | $\alpha = 0,05$ |

3.6 Discusión

Wu (1997) y Wu (1999), en sus diferentes trabajos con infiltrómetros de anillo simple estableció que la infiltración no era muy sensible ni al diámetro del anillo ni tampoco a la profundidad de inserción. En el presente trabajo sin embargo se utilizó siempre el mismo diámetro del cilindro y la misma profundidad de inserción, para eliminar al máximo el posible error atribuido a estas diferentes metodologías. Las variaciones encontradas en la velocidad de infiltración para éste método (simple anillo) rondaron entre el 38 y 75 % ocurridas de las distintas mediciones a campo y estuvieron probablemente asociadas a las diferencias en las condiciones de uso y manejo consideradas en el trabajo, pero también a variaciones en la condición edáfica dentro de cada situación de uso atribuidas, por ejemplo, a la historia de tránsito diferencial de maquinarias en la superficie del sitio correspondiente a cada situación de uso. En este sentido resulta llamativo el elevado C.V (56%) observado en las mediciones correspondientes a la situación de mínimo disturbio (S3) si se considera que no ha tenido intervención por un prolongado periodo de tiempo. En este caso, ésta variación puede estar asociada a la presencia de grietas o bioporos generados por raíces y/o insectos.

Prieto et al. (2006), compararon en suelos de Córdoba, Colombia, la conductividad hidráulica saturada (K_s) obtenida a campo con el método de infiltrómetro de tensión de disco y la obtenida con el infiltrómetro de anillos concéntricos. Establecieron que los resultados obtenidos de K_s con el infiltrómetro de anillos fueron significativamente mayores a los conseguidos con el infiltrómetro de tensión de disco. En el presente trabajo no se estimó la K_s , pero en los valores de velocidad final de infiltración las diferencias entre estos métodos fueron significativas. Éste comportamiento relativamente similar entre ambas metodologías resulta de interés al considerar que el método del permeámetro resulta ser de mayor practicidad por su facilidad, tiempo, número de operarios, bajos consumos de agua y menor variabilidad (CV= 22-29%) respecto al método del doble anillo concéntrico. Por otro lado, en éste presente trabajo se propone un modelo de ajuste entre ambas metodologías, y aunque los indicadores de calidad del mismo muestran un error elevado, el mismo puede constituir una herramienta posible de perfeccionar, por ejemplo, a través del control del estado de humedad del suelo al momento de la medición, el incremento en el número de repeticiones a campo o en la búsqueda de otros modelos de ajuste que consideren más de una variable regresora o predictora o probar la incidencia de aplicar modificaciones en el diseño de los equipos utilizados.

En éste último sentido, Moret y González (2009), presentaron un nuevo método que, aplicado a un diseño de infiltrómetro con disco separado del depósito, permite medir la tasa



de infiltración de agua en el suelo a partir de la pérdida de carga producida en el tubo de conexión entre disco y depósito. Este método fue calibrado en laboratorio y testeado en campo utilizando un nuevo prototipo de infiltrómetro de disco, haciendo a éste método una alternativa viable a los métodos convencionales para medir la tasa de infiltración comúnmente utilizada en infiltrometría de disco. Este método permite, a diferencia del método clásico utilizado en infiltrómetros de disco, medir tasas de infiltración instantáneas o realizar medidas simultáneas de infiltración en varios puntos utilizando un solo depósito de agua de gran capacidad, mientras que el método convencional solo mide la tasa de infiltración a partir de la caída de nivel de agua en el depósito del infiltrómetro. El gran ajuste que encontraron en su trabajo probablemente sea debido a que no se contrastó entre infiltrómetros, sino que se utilizó un solo dispositivo y lo que se contrastó fueron los niveles de caudales de agua utilizados. En el presente trabajo el objetivo no fue encontrar un método de cálculo para un infiltrómetro en particular, ni comparar entre distintos caudales de agua sino que por el contrario fue hallar una ecuación que permitiera relacionar entre los métodos comparados, por esta razón se encontró diferencia estadísticamente significativa de falta de ajuste para poder estimar la velocidad de infiltración final del doble anillo a partir del permeámetro o del anillo simple. Estas diferencias de velocidades de infiltración final entre las metodologías probablemente se deban a la naturaleza constructiva de los infiltrómetros utilizados y al contenido hídrico bajo al inicio de las mediciones.

Walsh y McDonnell (2012), utilizaron un infiltrómetro de anillo simple y uno de doble anillo, para medir la infiltración a campo y comparar entre estos dos métodos. Los ensayos se realizaron en un suelo arcilloso que provenía de una rotación trigo-maíz y el resultado fue que no hubo diferencias significativas en las tasas de infiltración entre métodos, lo cual se atribuyó a la práctica de saturación del suelo antes de medir la velocidad de infiltración, indicando que estos métodos son igualmente adecuados para la determinación de la tasa de infiltración cuando se trabaja en esta escala de lote. Sin embargo, en éste trabajo se demostró estadísticamente que para Hapludoles típicos de esta zona y, bajo tres condiciones de uso y manejo distintas, existen variaciones en la velocidad de infiltración final medida por estos dos métodos. Las diferencias halladas en el presente trabajo pueden estar asociadas al bajo contenido de humedad que presentaba el suelo al momento de la medición, y ello pudo haber incrementado los flujos laterales en la infiltración del anillo simple, aumentando la velocidad de infiltración en cada intervalo de tiempo.

Por otro lado éste trabajo tuvo por objetivo tratar de encontrar una relación matemática que relacionara los resultados obtenidos a través de estos dos métodos, de manera de medir a campo con un instrumento sencillo como el simple anillo y



transformarlos a los que se esperaba obtener con el doble anillo concéntrico. Si bien se encontró una ecuación de ajuste, la precisión de la misma no es confiable para transformar los datos del simple al doble anillo, por lo que resulta necesario continuar trabajando en este sentido, hasta obtener un modelo matemático que ajuste de manera confiable las mediciones realizadas por ambas metodologías.



CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES

- De las cuatro ecuaciones de ajuste planteadas, ninguna podría utilizarse como predictora para el cálculo de velocidad de infiltración a partir de los resultados obtenidos a campo del método del anillo simple o del permeámetro de disco.
- La falta de ajuste probablemente se deba a aspectos relacionados a la metodológico como diferencias en los dispositivos de medición, n° de repeticiones, a diferencias condición física del suelo debido a las diferentes situaciones de uso y manejo, al bajo contenido de humedad que presentaba el suelo al momento de la medición.



CAPÍTULO V: POSIBLES LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

- Si bien, en este trabajo no se logró encontrar un ajuste lineal entre las metodologías, cabe la posibilidad de realizar nuevamente las mediciones de los tres infiltrómetros, realizando un número mayor de repeticiones de manera de reducir el error experimental.

- También puede realizarse las mediciones de los tres infiltrómetros, saturando previamente el área de suelo donde se colocarían los instrumentos. Para este caso no debería tenerse en cuenta la profundidad de humedecimiento sino solamente la velocidad de infiltración.



CAPÍTULO VI: BIBLIOGRAFÍA

- Anderson T.H. 1991. Bedeutung der Mikroorganismen für die Bildung von Aggregaten im Boden, Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 154:409-416
- Aoki, A. M. y R. Sereno, 2006. Evaluation of infiltration as soil quality indicator by a microrainfall simulator. *Agriscientia* XXIII (1): 23-31.
- ASTM-Standard Test Method for Infiltration Rate of Soils in Field Using Double-Ring Infiltrimeter with Sealed-Inner Ring, Designation: D5093 – 02 (Reapproved 2008). Annual Book of ASTM standards, sec.4, vol.0408, Soil and Rock. American Society for Testing and Materials, Building Stones, ASTM, West Conshohocken, PA.
- Bricchi, E. 1996. Relaciones entre la compactación, la morfología y propiedades físicas de un hapludol típico de Río Cuarto. Tesis. Magister en Ciencias de Suelo. UBA. Buenos Aires. 163 p.
- Burt, CM. 1995. The Surface Irrigation Manual - A Comprehensive Guide to Design and Operation of Surface Irrigation Systems. Waterman Industries. Exeter, CA. 373 p.
- Bouwer H., 1986. Intake rate: Cylinder infiltrimeter. En: *Methods of soil analysis*. Klute, A., ed. Part I. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA, SSSA, Madison, WI, pp. 825-844.
- Cantero G., Alberto, Estela Bricchi, Víctor H. Becerra, José M Cisneros, y Horacio Gil. 1986. Descripción y zonificación de las tierras del departamento Río Cuarto. 1 carta 1:250.000. FAV, UNRC, Río Cuarto. 88p.
- Cantú, MP; A Becker; JC Bedano & HF Schiavo. 2007. Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. *Ciencia del Suelo* 25(2): 173-178.
- Carter, M.R., Gregorich, E.G., Anderson, D.W., Doran, J.W., Janzen, H.H. y Pierce, F.J. 1997. Concepts of soil quality and their significance. En *Soil quality for crop production and ecosystem health* (eds. Gregorich, E.G. y Carter, M.). Elsevier Science Publishers, Amsterdam, Netherlands.
- Castillo Gutierrez Sonia y E. D. Lozano Aguilera. 2007. Q-Q Plot Normal. Los puntos de posición gráfica. Departamento de Estadística e Investigación Operativa. Universidad de Jaén. Campus Las Lagunillas s/n, CP:23071, Jaén.



- Cisneros, J. M.; Cholaky, C. G.; A. Cantero Gutierrez; J. G. Gonzalez; M. A. Reynero; A. Diez; L. Bergesio. Erosión hídrica: Principios y técnicas de manejo. 2012.
- Conover, W.J. (1999). Practical Nonparametric Statistics. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Cruz Bautista A., J. Etchevers Barra, R.F. del Castillo, C. Gutiérrez. 2004. La calidad del suelo y sus indicadores. Ecosistemas: Revista Científica y Técnica de Ecología y Medio Ambiente. Edición nº 13 (2): 90-97. Mayo 2004.
- Degioanni, A. 1998. Organización territorial de la producción agraria en la región de Río Cuarto. Tesis doctoral. Universidad de Alcala de Henares. Dpto de geografía. Alcala Henares. España.
- Diez, Alejandro. 2006. Propiedades hidráulicas de un Hapludol Típico bajo dos sistemas de manejo. Tesis de grado. Universidad Nacional de Río Cuarto. Dpto. Ecología Agraria. Río Cuarto. Córdoba. Argentina.
- Di Renzo, I., F. Casanoves, L. Gonzales, E. Tablada, M. Diaz, C. Robledo y M. Balzarini. 2008. Estadística para las Ciencias Agropecuarias. Editorial Brujas. ISBN 978-987-591-112-3. Argentina. 356 p.
- Doran, J.W and M.R Zeiss. 2000. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. Appl. Soil Ecol. 15: 3-11.
- Ferreras, I.; G. Magra; P. Besson; E. Kovalevsk; F. García. 2007. Indicadores de calidad física en suelos de la región pampeana norte de argentina bajo siembra directa. Ciencia del Suelo 25: 159-172.
- Gil Rodolfo C. 2006. Ing. Agr. Msc. Técnico investigador del instituto de suelos. CIRIN. INTA Castelar. Manual del Permeámetro de Disco.
- Gómez Tagle Alberto, J. Batlle, H. Z. Castro, M. A. Guevara Santamaría, S. Maldonado y J. E. Pintor. 2008. Conductividad hidráulica saturada de campo: uso de un Infiltrómetro de carga constante y anillo sencillo. Terra Latinoamericana. Volumen 26 Número 4.
- Gregorich, E.G., Carter, M.R., Angers, D.A., Monreal, C.M. y Ellert, B.H. 1994. Towards a minimum data set to asses soil organic matter quality in agricultural soils. Canadian J. of Soil Science 74: 367-386.



- Hamilton, J.D. (1994). Time Series Analysis. Princeton, New Jersey: Princeton, Univ. Press.
- Hünemeyer, J.A., De Camino, R. y Müller, S. 1997. Análisis del desarrollo sostenible en Centroamérica: Indicadores para la agricultura y los recursos naturales. IICA/GTZ. San José, Costa Rica.
- Iriarte, A.; M. Simón; I. García; E. Barahona e I. Ortiz. Mayo 2000. Propiedades hídricas de los suelos de olivar mediante simulación de lluvia. Revista de la Sociedad Española de Ciencia del Suelo. Edafología. Volumen 7-2. Página 67-74. Dep. Legal GR-1101-95. ISSN 1135-6863.
- Jaramillo Angulo R., Vandervaere J.P., Roulier S., Thony J.L., Gaudet J.P., Vauclin M., 2000. Field measurements of soil surface hydraulic properties by disc and ring infiltrometers. A review and recent developments. Soil & Till. Res. 55, 1-29.
- Jarsún, Bahill, Juan A. Gorgas, Eduardo Zamora, EsmerBosnero, Edgar Lovera, Andres Ravelo, y José L. Tassile. 2003. Recursos Naturales de la provincia de Córdoba: Los suelos. Agencia Córdoba D.A.C.y T.S.E.M Dirección de Ambiente, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Manfredi, Córdoba.
- Johnson, A. I. 1991. A Field Method for Measurement of Infiltration: General ground-water techniques. U.S. Department of the Interior. United States government printing office, Washington. Second Printing 1991.
- Kenney, J. F. and Keeping, E. S. 1951. Mathematics of Statistics, Pt. 2, 2nd ed. Princeton, NJ: Van Nostrand.
- Moret, D.; González, C. 2009. Nuevo Método de Medida de Tasa de Infiltración de Agua en el Suelo por Infiltrometría de Disco. Jornadas de investigación en la Zona no Saturada del Suelo. Barcelona. Vol IX.O. Silva et al.
- Perroux, KM and I. White. 1988. Designs for disc permeameters. Soil Sci. Soc. Am. J. 52: 1205-1215.
- Prieksat, M. A., M. D. Ankeny, and T. C. Kaspar. 1992. Design for an automated, selfregulating, single-ring infiltrometer. Soil Sci. Soc. Am. J. 56: 1409-1411
- Porras Lara A.M. 2002. Estadística para ciencias biológicas y ciencias ambientales. Problemas y exámenes resueltos. Ed. Proyecto sur



- Prieto Bernardo, R. E. Támara, J. A. Peroza. 2006. Comparación de dos métodos de campo para la determinación de la conductividad hidráulica saturada en suelos del Sinu (Cordoba, Colombia). Universidad de Córdoba, Colombia, Departamento de Ingeniería Agronómica y Desarrollo Rural, Carrera 6 No. 76-103.
- Quiroga, A y D Funaro. 2004. Materia orgánica, factores que condicionan su utilización como indicador de la calidad en molisoles de las regiones semiárida y subhúmeda pampeana. XIX C.A.C.S., Paraná. Resumen pág. 476, trabajo en CD-ROM.
- Rossi Silva, M. 2004. Evaluación de la estabilidad estructural en superficie, a través de las propiedades hidráulicas. En R. Filgueira y F. Micucci, Editores. Metodologías físicas para la investigación del suelo: Penetrometría e Infiltración. Editorial de la Universidad de la Plata. Pp: 121-130.
- Segeer, C. D & Villodas, R. (2006). Hidrología I. Unidad 7. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Cuyo.
- Soracco, C. G. 2008. Efecto de la compactación sobre el sistema poroso del suelo en diferentes situaciones de labranza; modelización y realidad. Tesis Doctoral de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad Nacional de La Plata. 150 pp.
- SQI-Soil Quality Institute. 1996. *Indicators for Soil Quality Evaluation*. USDA Natural Resources Conservation Service. Prepared by the National Soil Survey Center in cooperation with The Soil Quality Institute, NRCS, USDA, and the National Soil Tilth Laboratory, Agricultural Research Service. USA.
- Utts Jessica M. .2005. Seeing Through Statistics 3rd Edition, Thomson Brooks/Cole. pp 166-167. ISBN 0-534-39402-7
- Walsh, E. and McDonnell, K.P. (2012). The Influence of Measurement Methodology on Soil Infiltration Rate. *International Journal of Soil Science*, 7: 168-176.
- Wu, L. and L. Pan. 1997. A generalized solution to infiltration from single-ring infiltrometers by scaling. *Soil Science Society of America Journal* vol. 61, September-October, 1318-1322.



Wu, L.; Mitchell, J. and B. Sanden. 1999. Measuring saturated hydraulic conductivity using a generalized solution for single-ring infiltrometers. Soil Science Society of America Journal vol. 63, July-August, 778-792.