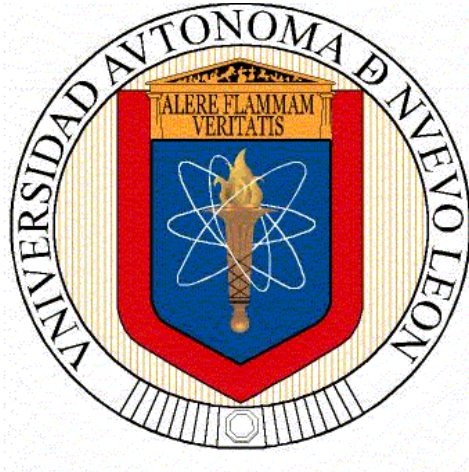


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA**



TESIS

**ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE INFILTRACIÓN EN SUELOS DE
LA REGIÓN DE LINARES-HUALAHUISES, NUEVO LEÓN**

PRESENTA

EMMANUEL DURÁN SALDAÑA

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS GEOLÓGICAS**

LINARES, NUEVO LEÓN,

OTUBRE 2015



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FCT

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA

LA TESIS

**ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE INFILTRACIÓN EN SUELOS DE LA REGIÓN
DE LINARES-HUALAHUISES, NUEVO LEÓN**

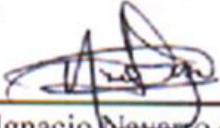
ELABORADO POR

EMMANUEL DURÁN SALDAÑA

HA SIDO ACEPTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL GRADO
ACADÉMICO DE

MAESTRO EN CIENCIAS GEOLÓGICAS

DIRECTOR DE TITULACIÓN


Dr. Ignacio Navarro de León

LINARES, NUEVO LEÓN.

OCTUBRE DEL 2015



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FCT

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA

LA TESIS

**ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE INFILTRACIÓN EN SUELOS DE LA REGIÓN
DE LINARES-HUALAHUISES, NUEVO LEÓN**

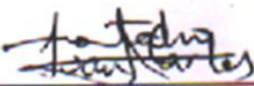
ELABORADO POR

EMMANUEL DURÁN SALDAÑA


HA SIDO ACEPTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL GRADO
ACADÉMICO DE

MAESTRO EN CIENCIAS GEOLÓGICAS


COMITÉ DE REVISIÓN



Dr. Juan Carlos Montalvo Arrieta
Co-director de Titulación



Dr. Ignacio Navarro de León
Director de Titulación




M.C. Eirain Alva Niño
Co-director de Titulación

LINARES, NUEVO LEÓN.

OCTUBRE DEL 2015

Por este medio declaro bajo protesta, haber realizado esta tesis de manera personal y haber utilizado únicamente los medios, procedimientos y asesorías descritas en la misma.



Emmanuel Durán Saldaña

Linares, Nuevo León, 2015.

DEDICATORIA

*Primeramente agradezco a **Dios** por prestarme la vida, haberme dado paciencia, fuerza y permitirme llegar a este momento de mi vida, muchas gracias.*

*El presente trabajo se los dedico especialmente con mucho cariño a mi hija **Angella Fernanda Durán Mendoza**, a mi padre **José Manuel Durán Garza** y a mi madre **Raquel Saldaña Montoya** por darme todo su amor, comprensión, apoyo, confianza, alientos, por acompañarme durante toda mi vida y momentos difíciles, Muchas Gracias.*

*A mis hermanos **Edgar, Nelda Judith y Jorge Durán Saldaña**, mi sobrino **Ángel Manuel Bravo Durán**, así como también a **María Fernanda Mendoza García**, por formar parte de mi vida, estar siempre en cada momento conmigo y brindarme todo su amor, comprensión y cariño.*

*A mis abuelos **José Durán de la Rosa** (por ser un gran ejemplo y parte importante en mi formación personal y profesional) y **María Antonia Garza Herrera, Irma Montoya Bueno y Florentino Saldaña Puente (†)** por apoyarme y acompañarme siempre a lo largo de toda mi vida.*

AGRADECIMIENTOS

A la Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León, y con ello a todo el cuerpo académico, técnico y administrativo de la misma por el apoyo brindado durante mi carrera.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo brindado con la beca para maestría para que fuese posible realizar el posgrado de Maestría en Ciencias Geológicas. Y a la Facultad de Ciencias de la Tierra por darme las facilidades para terminar parte de los trabajos de campo y realizar los estudios a las diferentes muestras utilizadas en este trabajo en el laboratorio, sin los cuales no hubiese sido posible la elaboración de la tesis.

Al Dr. Ignacio Navarro de León, por su asesoría en esta tesis, por compartir sus amplios conocimientos, tiempo y apoyo brindado para realizar esta tesis, así como sus consejos.

A los miembros del Comité de revisión de tesis, el Dr. Juan Carlos Montalvo Arrieta, y el M.C. Efraín Alva Niño, por su disponibilidad, amabilidad en la revisión de este trabajo y por sus valiosas sugerencias aportadas al mismo.

Al personal docente de la Facultad: Dr. Francisco Medina Barrera, Dr. Fernando Velasco Tapia, Dr. José Rosbel Chapa Guerrero, Mtra. María Manuelita González Ramos, Dr. Gabriel Chávez Cabello, M.C. Tomás Cossío Torres, Dr. Sóstenes Méndez Delgado, Dr. Dirk Massuch Oesterreich.

Al personal administrativo de la Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL, por su apoyo durante los trámites de inscripción cada semestre y de titulación: Juany Montes. Al personal de mantenimiento e intendencia de la Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL.

A mis amigos Jesús Federico Marín Martínez, su esposa Melisa, mi padre J. Manuel Durán y mi madre Raquel Saldaña, por haberme apoyado incondicionalmente en el trabajo de campo de esta tesis.

Especialmente a mi hija Angella Fernanda Durán Mendoza, así como a la Lic. María Fernanda Mendoza García, M.C. Juan Carlos Flores Villareal (Dr. Chang.), al Dr. Héctor Enrique Cortes Cabrera, Lic. José Hipólito Duarte Cervantes y al Ing. Jonathan Jasso Saldaña por ser mis incondicionales amigos y a la vez, por su apoyo y motivación para que realizara el posgrado de Maestría en Ciencias Geológicas.

A mis amigos que han estado conmigo en el desarrollo de mi vida, carrera y compañeros de trabajo: María Fernanda Mendoza García, Juan Carlos Flores Villareal, Héctor Enrique Cortes Cabrera, Javier, Cesar, Jesús Federico Marín Martínez, Melisa, Monserrat.

A mis amigos de la escuela en el posgrado y compañeros tesisistas: Ariel, Poolet, Luis, Javier, Rafael, Aurora, Carmen, Silverio, Jorge, Cesar, etc...

A todos por el lapso de tiempo que compartimos y por su apoyo.

Muchas Gracias!!!!

ÍNDICE

Contenido	Página
ÍNDICE DE FIGURAS	I
ÍNDICE DE TABLAS	IV
RESUMEN	V
ABSTRACT	VI
 CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN	
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. La infiltración de agua en suelos de México.....	5
1.3. Estudios de la infiltración de agua en los suelos en Nuevo León.....	7
1.4. Enfoque del trabajo de investigación.....	9
1.5. Hipótesis.....	10
1.6. Objetivos.....	10
1.7. Metas.....	10
 CAPÍTULO II GENERALIDADES	
2.1. Localización del área de estudio.....	11
2.2. Fisiografía.....	14
2.3. Orografía.....	14
2.4. Geomorfología.....	16
2.5. Hidrografía.....	16
2.6. Climatología.....	17
2.7. Vegetación.....	18
2.8. Tipos de suelo.....	18
 CAPÍTULO III FUNDAMENTOS TEÓRICOS	
3.1. El concepto de infiltración.....	20
3.2. Evolución histórica del concepto de infiltración.....	21
3.3. Escala espacial.....	21
3.4. Escala temporal.....	23
3.5. Mecanismos de infiltración.....	23
3.6. Factores que intervienen en la infiltración.....	25
3.6.1. Factores meteorológicos.....	25
3.6.2. Características pedológicas.....	26
3.6.3. Factores bióticos.....	37
3.6.4. Factores dependientes del fluido.....	38
3.6.5. Factores antrópicos.....	39
3.7. Técnicas empleadas en la zona superficial (no saturada) para estimar la infiltración.....	41
3.7.1. Métodos indirectos para la estimación de la infiltración.....	42
3.7.2. Métodos directos para la estimación de la infiltración.....	45
3.8. Metodología para la evaluación de las características físicas de los suelos.....	50

3.8.1. Técnicas para determinar la granulometría de los suelos.....	50
3.8.2. Técnicas para determinar la textura de los suelos.....	52
3.8.3. Determinación del contenido de humedad del suelo.....	52
3.8.4. Determinación de la densidad del suelo.....	56
3.9. Integración y análisis de la información de campo y laboratorio.....	59
3.9.1. Análisis para el tipo de muestreo.....	59
3.9.2. Selección del método estadístico.....	59
3.9.3. Método de Regresión.....	60
3.9.4. Pruebas de Normalidad.....	60
3.9.5. Coeficiente de correlación.....	61
3.9.6. Correlación Canónica.....	61
3.9.7. Análisis de Factores.....	62
3.9.8. Análisis de Clúster.....	62
3.9.9. Software estadístico.....	69

CAPÍTULO IV METODOLOGÍA

4.1. Determinación del tipo de suelo.....	70
4.2. Determinación del uso de suelo.....	70
4.3. Técnica empleada para estimar la infiltración en la zona superficial (no saturada).....	71
4.3.1. Calibración del equipo.....	72
4.4. Sitios de muestreo.....	73
4.5. Toma de datos en campo y laboratorio.....	74
4.5.1. Tipo de vegetación natural en el área de estudio.....	75
4.5.2. Pendiente en los tipos de suelo.....	76
4.5.3. Compactación del suelo.....	76
4.5.4. Otros parámetros del terreno evaluados.....	76
4.5.5. Granulometría de los suelos.....	77
4.5.6. Metodología de laboratorio para determinar la textura en los suelos.....	78
4.5.7. Determinación del contenido de humedad del suelo.....	78
4.5.8. Determinación de la densidad del suelo.....	79
4.6. Análisis de la información de campo y laboratorio.....	80
4.6.1. Método de Regresión para calcular tasas de infiltración.....	81
4.6.2. Pruebas de Normalidad.....	81
4.6.3. Coeficiente de correlación.....	82
4.6.4. Correlación Canónica.....	82
4.6.5. Análisis de Factores.....	82
4.6.6. Análisis de Clúster.....	83
4.6.7. Software estadístico.....	83
4.6.8. Integración de la información en un sistema de información geográfica.....	84

CAPÍTULO V RESULTADOS

5.1. Tipos de suelo presentes en el área de estudio.....	85
5.2. Análisis granulométrico y textura en los suelos.....	87
5.3. Contenido de humedad de los suelos.....	91
5.4. Densidad de los suelos.....	92
5.5. Variables que influyen en la infiltración de los Suelos.....	94
5.5.1. Potencial de infiltración de los suelos.....	97

CAPITULO VI DISCUSIÓN	
6.1 Discusión.....	101
CAPÍTULO VII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
7.1 Conclusiones.....	104
7.2 Recomendaciones.....	106
CAPÍTULO VIII BIBLIOGRAFÍA	
8.1 Bibliografía.....	107
CAPÍTULO IX ANEXOS	
A-1. Tasas de infiltración.....	121
A-2. Granulometría de los suelos.....	145
A-3. Pruebas de normalidad.....	146
A-4. Pruebas de Kruskal-Wallis.....	148

ÍNDICE DE FIGURAS

Figuras	Páginas
Figura 1.1.	Incremento de la población mundial en millones de personas (Osoimehin, 2011)..... 3
Figura 2. 1.	Localización de la Cuenca del Río Pablillo, cubriendo parcialmente los municipios de Linares e Iturbide (modificado de Moctezuma, 2011)..... 12
Figura 2.2.	Censo poblacional de los municipios de Hualahuises y Linares, N.L. en 1980 y 2010 (INEGI, 2010)..... 13
Figura 2.3.	Localización de la parte baja de la Cuenca del Río Pablillo, la cual cubre principalmente los municipios de Hualahuises y Linares (imagen modificada de Google Earth, 2014)..... 13
Figura 2.4.	Mapas Fisiográficos que indica las Provincias Fisiográficas (izq.) y también la Subprovincia “Gran Sierra Plegada” (der.) del Estado de Nuevo León (INEGI, 1981)..... 2.4
Figura 2.5.	Localización de los suelos en la parte baja de la Cuenca del Río Pablillo, la cual cubre principalmente los municipios de Hualahuises y Linares..... 19
Figura 3.1.	La infiltración en relación con otros procesos que se desarrollan en los suelos (modificada de Moctezuma, 2011)..... 20
Figura 3.2.	La variabilidad de la infiltración depende principalmente del clima, suelo, la vegetación y la pendiente del terreno (a) en el clima húmedo el nivel freático es somero debido a las altas precipitaciones, altas tasas de infiltración y escorrentía. (b) en el clima semiárido y árido el nivel freático es profundo debido a las bajas precipitaciones, bajas tasas de infiltración y escorrentía. la percolación profunda tiene trayectorias largas. (c) en suelos arcillosos la capacidad de infiltración es baja y se favorece la escorrentía. la percolación es profunda. (d) en suelos arenosos la capacidad de infiltración es alta y desfavorece la escorrentía. la percolación es somera (e) las raíces poco profundas de la vegetación permiten que buena parte del volumen infiltrado sea transformado en percolación hacia zonas más profundas (profundidad de extinción de la et somera), (f) la vegetación con raíces profundas extiende la influencia para que el agua de infiltración regrese a la superficie en forma de evapotranspiración, reduciéndose las trayectorias de percolación (modificado de Moctezuma, 2011)..... 22
Figura 3.3.	Triángulo de texturas del sistema USDA (agricultura ecológica, 2013)..... 27
Figura 3.4.	Efecto de algunas estructura del suelo sobre la velocidad de infiltración (Cisneros, 2003; modificado de García, 2011)..... 31
Figura 3.5.	Fotografía de un tensiómetro para determinar la humedad en el suelo..... 46
Figura 3.6.	Fotografía de un simulador de lluvia en una superficie agrícola con vegetación..... 47
Figura 3.7.	Infiltrómetro de un anillo hincado en el suelo, midiéndose el descenso del agua..... 47
Figura 3.8.	Fotografía del infiltrómetro de doble anillo terminado con su tapa, la cual sirve para golpearlo en la parte central para que pueda hincarse en el suelo, así como con estructuras (agarraderas) para tomarlo con mayor facilidad para su manejo..... 49

Figura 3.9.	Fotografía de un hoyo cilíndrico en el suelo lleno de agua (método de porchet), midiendo el descenso de la misma para determinar la infiltración.	49
Figura 3.10.	Fotografía de pipeta de andreasen (10 cc).....	50
Figura 3.11.	Fotografía de hidrómetro.....	50
Figura 3.12.	Fotografía de cribas utilizadas para determinar la granulometría en muestras de suelos.....	51
Figura 3.13.	Fotografía de los tipos de texturas por el método del tacto de manera general.....	52
Figura 3.14.	Fotografía de un medidor de la conductividad eléctrica o de resistencia.....	53
Figura 3.15.	Esquema de funcionamiento de una sonda de neutrones de profundidad para determinar la humedad que tiene un suelo (modificado de florentino, 2011).....	53
Figura 3.16.	Explorador de rayos gama.....	54
Figura 3.17.	Diferentes tipos de TDR (Muñoz, 2004).....	54
Figura 3.18.	Fotografía secado el suelo con alcohol encendido.....	55
Figura 3.19.	Procedimiento para determinar el contenido de humedad en una muestra de suelo.....	55
Figura 3.20.	Esquema de un ensayo del cono de arena (in situ).....	57
Figura 3.21.	Diagrama de aparato de globo de hule (Guzmán, 2013).....	57
Figura 3.22.	Diagrama de densímetro nuclear.....	58
Figura 3.23.	Fotografía de medidor de humedad mediante bloques (Guzmán, 2013).....	58
Figura 4.1.	Esquema representativo del infiltrómetro de doble anillo (de cilindros concéntricos).....	72
Figura 4.2.	Determinación del frente de humedad con el infiltrómetro de doble anillo en un suelo de tipo vertisol en una área de uso agrícola.....	73
Figura 4.3.	Fotografía de la colocación del infiltrómetro de doble anillo en una área de uso agrícola de tipo de suelo vertisol (sin materia orgánica en el interior de los cilindros para evitar una lectura errónea en la información).....	74
Figura 4.4.	Vegetación Natural predominante en Ejido Vista Hermosa, Linares, N.L.....	75
Figura 4.5.	Fotografía adquiriendo una muestra de suelo, utilizando el método de cilindro.....	80
Figura 5.1.	Localización de los sitios de muestreo en la parte baja de la cuenca del Rio Pablillo.....	86
Figura 5.2.	Gráfico de error de datos de campo correspondientes a la variable arena (%) en diferentes tipos de suelo. Se muestran las agrupaciones obtenidas mediante el análisis de Kruskal-Wallis con letras de la “A” a la “C”. N=140.....	87
Figura 5.3.	Gráfico de error para los datos de campo correspondientes a la variable limo (%) en diferentes tipos de suelo. Se muestran las agrupaciones obtenidas mediante el análisis de Kruskal-Wallis con letras de la “A” a la “D”. N=140.....	88
Figura 5.4	Gráfico de error para los datos de campo correspondientes a la variable arcilla (%) en diferentes tipos de suelo. Se muestran las agrupaciones obtenidas mediante el análisis de Kruskal-Wallis con letras de la “A” a la “D”. N=140.....	89
Figura 5.5.	Gráfico de error para los datos de campo correspondientes a la variable arena (%) en diferentes usos de suelo. Se muestran las agrupaciones obtenidas mediante el análisis de Kruskal-Wallis con letras de la “A” a la “D”. N=140.....	89

Figura 5.6.	Gráfico de error para los datos de campo correspondientes a la variable limo (%) en diferentes usos de suelo. Se muestran las agrupaciones obtenidas mediante el análisis de Kruskal-Wallis con letras de la “A” a la “B”. N=140.....	89
Figura 5.7.	Gráfico de error para los datos de campo correspondientes a la variable arcilla (%) en diferentes usos de suelo. Se muestran las agrupaciones obtenidas mediante el análisis de Kruskal-Wallis con letras de la “A” a la “C”. N=140.....	90
Figura 5.8.	Granulometría de los suelos evaluados en el área de estudio.....	90
Figura 5.9.	Gráfico de error para los datos de campo correspondientes a la variable humedad (%) en diferentes tipos de suelo. Se muestran las agrupaciones obtenidas mediante el análisis de Kruskal-Wallis con letras de la “A” a la “B”. N=140.....	91
Figura 5.10.	Gráfico de error para los datos de campo correspondientes a la variable humedad (%) en diferentes usos de suelo. Se muestran las agrupaciones obtenidas mediante el análisis de Kruskal-Wallis con letras de la “A” a la “B”. N=140.....	91
Figura 5.11.	Gráfico de error para los datos de campo correspondientes a la variable densidad (g/cm ³) en diferentes tipos de suelo. Se muestran agrupaciones obtenidas mediante el análisis de Kruskal-Wallis con letras de la “A” a la “D”. N=140.....	92
Figura 5.12.	Gráfico de error para los datos de campo correspondientes a la variable densidad (g/cm ³) en diferentes usos de suelo. Se muestran agrupaciones obtenidas mediante el análisis de Kruskal-Wallis con letras de la “A” a la “C”. N=140.....	93
Figura 5.13.	Análisis clúster de las densidades de los suelos en distintos tipos y usos de suelo dentro del área de estudio.....	93
Figura 5.14.	Correspondencia canónica para la infiltración y los tipos y usos de suelo, ejes 1 y 2, índice de descripción gráfico 0.98.....	95
Figura 5.15.	Análisis de regresión para la densidad de los suelos con la infiltración. N=140.....	95
Figura 5.16.	Análisis de regresión para la arcilla de los suelos con la infiltración. N=140...	96
Figura 5.17.	Análisis de regresión para la arena de los suelos con la infiltración. N= 140...	96
Figura 5.18.	Gráfico de error para los datos de campo correspondientes a la variable infiltración (mm/h) en diferentes tipos de suelo. Se muestran las agrupaciones obtenidas mediante el análisis de Kruskal-Wallis con letras de la “A” a la “F”. N=140.....	98
Figura 5.19.	Mapa de los grupos generados en la prueba de Kruskal-wallis para la variable infiltración en diferentes tipos de suelo, las tonalidades más oscuras indican mayor potencial de infiltración.....	98
Figura 5.20.	Gráfico de error para los datos de campo correspondientes a la variable infiltración (mm/h) en diferentes usos de suelo. Se muestran las agrupaciones obtenidas mediante el análisis de Kruskal-Wallis con letras de la “A” a la “C”. N=140.....	99
Figura 5.21.	Mapa de los grupos generados en la prueba de Kruskal-wallis para la variable infiltración en diferentes usos de suelo, las tonalidades más oscuras indican mayor potencial de infiltración (INEGI, 2005).....	99
Figura 5.22.	Clúster de la infiltración en diferentes tipos y usos de suelo.....	100
Figura 5.23.	Potencial de infiltración en el área de estudio.....	100

ÍNDICE DE TABLAS

Tablas	Páginas
Tabla 3.1. Tipos de estructura de suelo y sus características (Cisneros, 2003; modificado de García, 2011).....	30
Tabla 3.2. Principales horizontes en el suelo definidos por el Soil Survey Staff (SSS, 1999).....	31
Tabla 3.3. Horizontes o capas maestros con propiedades combinadas en el suelo definidos por el Soil Survey Staff (SSS, 1999).....	32
Tabla 4.1. Número de tamiz de cada criba y su equivalencia en pulgadas, centímetros, milímetros y micras.....	78
Tabla 5.1. Localización de los sitios distribuidos en los 8 tipos y los 5 usos de suelo, haciendo 5 muestreos en cada una de las combinaciones, en diferentes localidades.....	85
Tabla 5.2. Coeficientes de correlación R, con respecto a la infiltración del suelo para cada parámetro evaluado en campo.....	94

RESUMEN

La infiltración es el primer mecanismo que tiene lugar en el ámbito de las aguas subterráneas (particularmente en la zona no saturada). Sin embargo, se desconoce el papel y la importancia que juegan los factores que la determinan. El objetivo de esta investigación fue determinar y analizar el potencial de infiltración de los suelos en la región de Linares-Hualahuis, Nuevo León ubicada dentro de la cuenca del Río Pablillo, mediante la evaluación directa de los principales factores que intervienen en el fenómeno de infiltración. Se utilizó un infiltrómetro de doble anillo tipo inundador para evaluar las tasas de infiltración en la zona superficial no saturada en un total de ocho tipos (feozem, fluvisol, litosol, luvisol, regosol, rendzina, vertisol y xerosol) y cinco usos (agrícola, ganadero, rural, forestal y urbano) de suelo, además de esto se evaluaron variables físicas del suelo en donde se encontró una relación negativa de las tasas de infiltración con el contenido de arcilla ($R = -0.64$, $P < 0.01$) y densidad del suelo ($R = -0.86$, $P < 0.01$), además de una correlación positiva con el contenido de arena ($R = 0.66$, $P < 0.01$) y la presencia de árboles en el terreno ($R = 0.39$, $P = 0.04$). La variable humedad estuvo controlada de modo que no influyó en los resultados. Dentro de los tipos de suelo evaluados, los que presentaron tasas de infiltración significativas mayores fueron los correspondientes al tipo litosol, mientras que los fluvisoles y xerosoles presentaron tasas significativas menores. Con respecto al uso de suelo evaluado, el uso forestal corresponde a tasas de infiltración significativamente mayores, mientras que el uso de suelo urbano corresponde a tasas significativas menores. Se concluye que tanto tipo como uso de suelo, son determinantes en el proceso de infiltración en la zona superficial no saturada de los suelos.

ABSTRACT

Infiltration is the first mechanism that takes place in the waterground area (particularly in the unsaturated zone). However, the role and importance played by determinants is unknown. The objective of this research was to identify and analyze the potential of soil infiltration in the region of Hualahuises-Linares, Nuevo Leon, located within the watershed of Pablillo River by direct evaluation of the main factors involved in the phenomenon of infiltration. We used an infiltrometer bubbler double ring type to assess infiltration rates in surface unsaturated zone, in a total of eight types (feozem, fluvisol, litosol, luvisol, regosol, rendzina, vertisol and xerosol) and five uses (agricultural, rural, forest and urban). We evaluated a physical variables, where we found negative co-relation of infiltration rates with clay content ($R=-0.64$, $P < 0.01$) and soil density (suelo ($R = - 0.86$, $P < 0.01$), in addition to a positive co-relation with sand content ($R = 0.66$, $P < 0.01$) and the presence of trees in the field ($R = 0.39$, $P = 0.04$). The humidity was a controlled variable so did not influence on the results. Within soil types evaluated, those with significant higher infiltration rates were for the type litosol, while fluvisoles and xerosols showed significant lower rates. Regarding the use of soil evaluated soil, forest use corresponds to significantly higher rates of infiltration, while urban land use correspond to significant lower rates. We conclude that both type and land use, are crucial in the process of infiltration in the superficial zone of unsaturated soils.

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El agua es fundamental para que exista la vida sobre la Tierra (Flores, 1997). Cada día, el ciclo hidrológico renueva los recursos mundiales de agua dulce por medio de la evaporación y la precipitación. Por ello, la pluviosidad mundial anual sobre la superficie terrestre se estima que es de aproximadamente 110,000 km³, pero alrededor de 70,000 km³ se evaporan antes de llegar al mar. Los restantes 40,000 km³ están potencialmente disponibles para su aprovechamiento humano; sin embargo, esa cantidad de agua disponible está distribuida de manera muy irregular y las dos terceras partes de ellos se pierden en anegamientos. Esto deja 14,000 km³ de agua de la cual una buena parte ha de ser dejada seguir su curso natural a fin de conservar los pantanos, los deltas, los lagos y los ríos (FAO, 1993). Parte de la precipitación no llega a alcanzar la superficie de la Tierra, por causa de la evaporación y otra es retenida por la vegetación, volviendo a la atmósfera de nuevo en forma de vapor. Del agua que alcanza la superficie de la Tierra por la precipitación, una pequeña porción es retenida como almacenamiento superficial, parte escurre hacia los ríos que irá a parar al mar, para evaporarse posteriormente. Otra porción de la precipitación experimenta el fenómeno llamado infiltración de agua en el terreno, debido a que su flujo es por medio de los poros y fisuras en el suelo. Por ello, el agua así infiltrada es interesante ya que es el primer mecanismo o fenómeno en el suelo en donde ya no podemos apreciar a simple vista el compuesto, debido a que pasa a formar parte del flujo subterráneo, el cual seguirá avanzando por manantiales, en lagos o mares directamente, o será extraída por el hombre (Morell y Hernández, 2000).

El agua dulce constituye cerca del 3 por ciento de los recursos hídricos del planeta, sin embargo dos terceras partes de esta se encuentran en forma de hielo en las capas polares y en regiones montañosas, lo que nos deja con solo un 1 por ciento del total de agua dulce en estado líquido, el cual está conformado casi en su totalidad por agua subterránea (más del 98 por ciento), mientras que menos del 2 por ciento de esta se encuentra en ríos y lagos. En los

climas húmedos y templados, cerca del 40 por ciento de la precipitación termina en agua subterránea y en los climas mediterráneos esta cifra se reduce a 10 y 20 por ciento. En los climas realmente áridos se puede reducir virtualmente a cero (Bouwer, 2002).

La infiltración es el movimiento del agua de la superficie hacia el interior del suelo. Este fenómeno es un proceso de gran importancia tanto para el hombre como para la naturaleza. Del agua infiltrada se proveen casi todas las plantas terrestres y muchos animales; alimenta al agua subterránea y a la vez a la mayoría de las corrientes en el período de estiaje; reduce las inundaciones y la erosión del suelo (Maderey y Jiménez, 2005). También es determinante e importante en el sustento y desarrollo de los seres vivos, por lo que desde sus inicios los asentamientos humanos han dependido en gran medida de la proximidad a fuentes de abastecimiento. Esta circunstancia ha provocado que la demanda de agua de buena calidad se incrementó con el paso del tiempo paralelamente al incremento demográfico (Salas *et al.*, 2011).

La población mundial a mediados del siglo XX se ha incrementado a tasas sin precedentes. La Organización de las Naciones Unidas (ONU), hace referencia que para el año 1950 la población global mundial se incrementó en casi 1,000 millones de habitantes (Mhab), pasando de 1,650 Mhab en el año de 1900, a 2,519 Mhab para 1950. Para el año de 1960 prácticamente alcanzó los 3,000 Mhab, y para 1975 llegó a 4,000 Mhab. Esta cifra rebasó los 5,000 y los 6,000 Mhab para los años de 1990 y 2000, respectivamente (ONU, 2009). El incremento a 7 mil millones de personas a nivel mundial en el año 2011, ha tenido consecuencias para el desarrollo en diversas actividades. Un mundo con esa cantidad de habitantes, supone desafíos y oportunidades con repercusiones en la sostenibilidad, la urbanización, así como el acceso a diversos servicios y al agua de buena calidad (ONU, 2013).

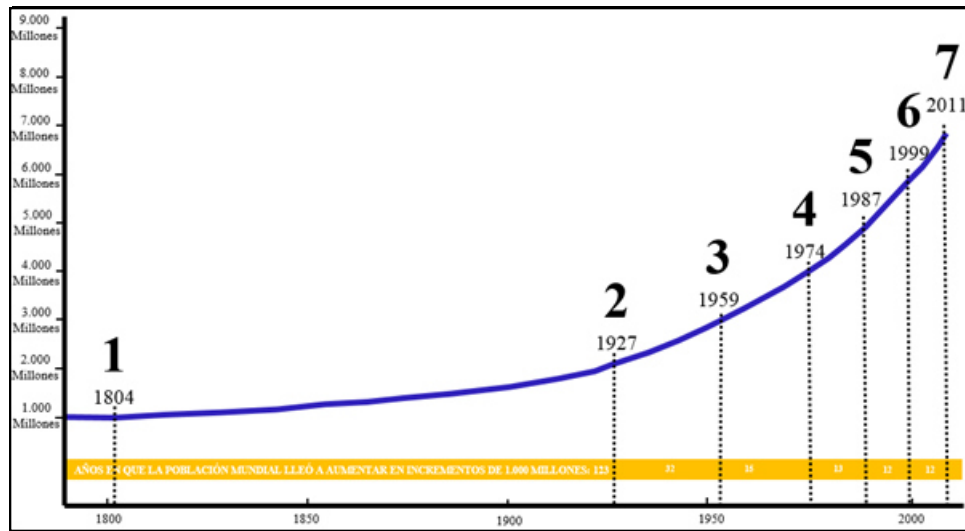


Figura 1.1. Incremento de la población mundial en millones de personas (Osotimehin, 2011).

Mientras la población humana se mantiene en constante aumento, se ha venido incrementando una serie de necesidades en los habitantes, lo cual implica un aprovechamiento cada vez más intensivo de los recursos naturales, entre los cuales se encuentra el recurso agua. De acuerdo a la Organización Mundial del Comercio (OMC), la cantidad de agua potable necesaria para uso doméstico es de 50 litros diarios por persona. Para el año 1993 la ausencia de agua potable, tanto en la cantidad indicada como en la calidad, era el origen de enfermedades que causaban la muerte a 30,000 personas al día. Mil doscientos millones de personas no tenían acceso a agua potable, 2,400 millones carecían de sistemas sanitarios y más de 3,000 millones no tenían un sistema de tratamiento de aguas residuales. En el mundo había más de 2.2 millones de personas muriendo cada año debido a enfermedades causadas por el agua potable contaminada y por un saneamiento deficiente (FAO, 1993).

Actualmente la escasez de agua es cada vez mayor. El agua subterránea está siendo bombeada de forma intensiva y los acuíferos se están contaminando y salinizando cada vez más en algunas zonas costeras. Gran parte de todos los continentes están experimentando altas tasas de degradación del ecosistema, en particular la disminución de la calidad del suelo, la pérdida de biodiversidad y los valores del patrimonio cultural. La agricultura utiliza actualmente el 11 por ciento de la superficie terrestre del mundo para la producción de cultivos. También hace uso del 70 por ciento del agua total extraída de los acuíferos, ríos y

lagos. La extracción de aguas subterráneas ha proporcionado una valiosa fuente de agua lista para el riego, pero es casi imposible de regular. Como resultado, la extracción intensiva de aguas subterráneas a nivel local es superior a las tasas de recarga natural en los principales lugares de producción de cereales, en países de ingresos altos, medianos y bajos. Teniendo en cuenta que muchos sectores clave de producción alimentaria dependen de las aguas subterráneas, la reducción de los niveles de los acuíferos y la extracción continua de aguas subterráneas no renovables supone un riesgo creciente para la producción alimentaria local y mundial (FAO, 2011).

La presión humana sobre los recursos hídricos crece según aumentan el nivel de ingresos. Esto sucede no solo con la demanda de agua para usos domésticos, sino también con la demanda municipal y con la demanda de productos agrícolas e industriales. El crecimiento económico viene acompañado de un mayor consumo de bienes manufacturados, energía eléctrica, servicios, etc., y todo ello aumenta la demanda de agua (FAO, 2013). En los países en desarrollo, las crecientes extracciones de agua y el agotamiento de los recursos hídricos a favor del riego, han favorecido el crecimiento económico y la reducción de la pobreza pero frecuentemente su efecto sobre el medio ambiente ha sido negativo. El aumento de la demanda de agua en ciudades e industrias ofrece oportunidades para la generación de empleos e ingresos. Sin embargo, esto desvía el uso del agua destinada a la agricultura, crea tensión en las comunidades rurales y contamina el agua. El consumo de carne y pescado va en aumento, lo que favorece a la acuicultura y a la producción industrial de ganado, generando ingresos y bienestar; pero, también ejerce más presión sobre los recursos hídricos y el medio ambiente (FAO, 2007).

Se estima que para el año 2050 se necesite un 60% más de alimentos para cubrir la demanda de una población que en algún momento superará los 9 billones de personas. El resultado neto de todo esto es que el uso del agua para la agricultura aumentará la severidad de la escasez de agua en algunas zonas, causando escasez incluso en áreas que actualmente cuentan con un buen nivel relativo de recursos hídricos (FAO, 2013).

1.2. La infiltración de agua en suelos de México

Osuna (1996) desarrolló un estudio en la región árida del altiplano Zacatecano-Potosino, en el cual evaluó cuantificativamente el efecto de la energía cinética de lluvia simulada sobre la rugosidad superficial e infiltración de agua en un suelo Cambisol eútrico bajo dos sistemas de labranza (labranza de discos más rastra o labranza tradicional y labranza cero) en los cuales se aplicaron cuatro niveles de precipitación (40, 120, 200 y 280 mm) por medio de un simulador de lluvia. Los parámetros físicos medidos fueron: La rugosidad superficial del suelo, infiltración, escurrimiento, energía cinética de la lluvia y el espacio poroso del suelo. Los resultados obtenidos mostraron que la rugosidad superficial del suelo y la infiltración del agua de lluvia disminuyeron conforme se incrementó la energía cinética de la lluvia, por lo que un modelo de tipo exponencial describe el efecto de los cambios de rugosidad e infiltración en ambos sistemas de labranza. La labranza cero mostró los valores más altos de rugosidad e infiltración y menor escurrimiento en relación con el sistema de labranza tradicional, el cual presentó los valores de rugosidad e infiltración más bajos y por consiguiente mayor escurrimiento.

Osuna y Padilla (1998) realizaron un análisis para determinar y evaluar bajo condiciones de campo algunos parámetros que fueron comúnmente coeficientes de ecuaciones, que explican la infiltración acumulada o la tasa de infiltración. El estudio se llevó a cabo en tres tipos de suelos de la región semiárida del norte-centro y sur de Jalisco, México. Simultáneamente este estudio proporcionó información sobre la relación que existe entre el parámetro de la ecuación de Philip y la conductividad hidráulica. Los resultados indican que el método de estimación proporciona un ajuste adecuado y que la selección de un valor apropiado del factor "C" (el cual es un coeficiente que relaciona a la tasa de infiltración final medida en campo, con el parámetro de la ecuación de Philip), es importante en la determinación de los parámetros de infiltración con datos de campo.

Tello (2008) identificó el proceso de infiltración y determinó las variables hidrológicas y de vegetación en dos localidades experimentales en el Valle de CuatroCiénegas, Coahuila, en las cuales se midieron las características de la cobertura del

suelo y variables hidrológicas del escurrimiento, para ello utilizó un simulador de lluvia con diferentes intensidades (de moderada a alta). Los resultados obtenidos indicaron que no existen diferencias estadísticas en las tasas de infiltración entre localidades, intensidad aplicada y cobertura. Las variables de cobertura del suelo por arbustivas y herbáceas contribuyeron positivamente a las tasas de infiltración y se obtuvo un resultado negativo con la presencia de hojarasca (así como con mayor cantidad de rocas y suelo desnudo).

Yañez (2008) analizó el proceso de infiltración en el campo experimental de zonas áridas y semiáridas con matorral desértico y micrófilo que es propiedad de la Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro" en el municipio de Matehuala, San Luis Potosí. El fenómeno de infiltración se analizó utilizando un simulador de lluvia para generar alta y baja intensidad de aplicación de agua. Los resultados obtenidos sobre la tasa de infiltración, escurrimiento, cobertura del suelo y variables hidrológicas, no presentan diferencias estadísticas y se deduce que ninguna afecta la entrada del agua al suelo.

García *et al.* (2008) midieron la velocidad de infiltración media de agua en el suelo de seis ecosistemas de la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda, en el estado de Querétaro, Los seis ecosistemas analizados fueron: bosque de pino con mantillo, bosque de encino, pastizal, selva baja caducifolia, matorral xerófilo dominado por *Larrea tridentata* y de *Acacia constricta*, bosque de pino con mantillo removido. Se concluyó que la presencia del mantillo es uno de los factores determinantes que incrementan la velocidad de infiltración media de agua en el ecosistema. Otros factores que parecen afectar la tasa de infiltración son: la cercanía a los cuerpos de agua, la textura edáfica y la edad del ecosistema.

Por otra parte Salas *et al.* (2011) en el valle de Toluca presentaron una investigación consistente en cuantificar el proceso de infiltración en la zona no saturada del área de fracturas. Para ello, se siguió un esquema que combina tanto el desarrollo tecnológico como la modelación numérica. Así, los resultados de los sondeos eléctricos verticales efectuados contrastados con la información aportada por la perforación de un pozo de monitoreo realizado durante el propio proyecto, han puesto de manifiesto las características litológicas de los materiales involucrados. Éstos consisten en basalto fracturado, recubierto por un

horizonte limo-arcilloso de espesor variable. Los resultados obtenidos a través de las diferentes simulaciones evidencian que la naturaleza de la primera capa es determinante en la tasa de infiltración. En los últimos dos meses de observación hubo un sellado parcial de las fracturas debido a los sólidos en suspensión presentes en las aguas residuales. En principio esto contribuyó a retardar el proceso de infiltración y a reducir la capacidad de infiltración.

1.3. Estudios de la infiltración de agua en los suelos en Nuevo León

De acuerdo con el análisis de la literatura, en la región principal del presente estudio la cual comprende la parte baja del río Pabillo, los primeros trabajos sobre aspectos hidrológicos se desarrollaron a partir de la década de los 80's del siglo pasado. Los aspectos hidrológicos generales de la cuenca del río Pabillo fueron descritos por De León-Gómez (1989) quien menciona las características del drenaje superficial, así como también presenta un análisis de los principales escurrimientos en la cuenca durante décadas pasadas.

Návar y Synnott (2000a) realizaron un trabajo, cuyos objetivos fueron ajustar cuatro modelos no-lineales a 96 pruebas de infiltración y determinar el efecto del uso del suelo en la tasa de infiltración de vertisoles del noreste de México. Las pruebas de infiltración se realizaron con el uso de infiltrómetros dobles de carga constante durante el periodo de julio a noviembre de 1985 en los terrenos de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL). Los usos del suelo probados fueron: agricultura, pastizal, matorral y plantación forestal. Los modelos de infiltración de Green y Ampt, el modificado de Kostiakov, y los modelos de Horton y Philip fueron ajustados a los datos de infiltración. Los resultados demostraron que el modelo modificado de Kostiakov se ajustó mejor a las tasas de infiltración observadas. Las tasas finales de infiltración fueron mayores y con mayor variación en vertisoles con usos agrícolas, plantaciones forestales o pastizales que aquellas de los vertisoles de los matorrales. La explicación probable a este comportamiento fue la densidad, presencia de las grietas, orientación o geometría, profundidad y rugosidad que influyen en la infiltración entre los usos del suelo.

Návar y Synnott (2000b) desarrollaron un trabajo en el cual estudiaron la escorrentía superficial, la erosión y el uso del suelo en el noreste de México, planteándose los siguientes objetivos: 1) determinar el efecto de los cambios de uso del suelo en la escorrentía superficial y la erosión, y 2) ajustar la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo de Wischmeier (USLE) a la erosión observada. En total, 12 lotes de escorrentía superficial se establecieron en vertisoles con cuatro usos: 1) agrícolas, 2) pastizales, 3) matorrales y 4) plantaciones; con tres repeticiones. Los volúmenes de escorrentía superficial y cantidades de suelo erosionado se midieron durante 1985. Los suelos agrícolas produjeron 10 y 40 veces más volúmenes de escorrentía superficial y cantidades de erosión, respectivamente, que los suelos con los otros usos descritos. La cantidad de suelo erosionado observada y la estimada por la Ecuación Universal difirieron, lo cual indica la alta variación temporal de la erosión hídrica en los suelos estudiados. Este trabajo demuestra la necesidad de establecer medidas prácticas de conservación de suelos en terrenos agrícolas y enfatiza la necesidad de continuar investigando estos procesos en vertisoles.

Lizárraga-Mendiola *et al.* (2004) analizaron las fuentes de contaminación en el tiradero municipal de Linares, Nuevo León, donde identificaron distintas fuentes de contaminación puntual (tiradero municipal, granjas porcícolas, depósitos de barita) y contaminación no puntual (descargas de aguas residuales a través de fosas sépticas y letrinas), concluyendo que es de gran importancia considerar el papel de la infiltración, como mecanismo que controlaría en gran medida la recarga directa a los acuíferos, además de favorecer el ingreso potencial de contaminantes (causados por los desechos urbanos y las actividades de la población) hacia la zona saturada de las aguas subterráneas.

Moctezuma (2011) realizó un trabajo el cual consistió en evaluar la magnitud y distribución de la recarga directa natural en la región de Linares, Nuevo León, mediante la aplicación de un método indirecto que involucra un balance de masa de cloruros. Para llevar a cabo este trabajo se analizó el ión cloruro, el cual permite calcular el flujo másico de este elemento conservativo desde la precipitación hasta las aguas subterráneas, indicando así la tasa de recarga directa. La distribución que exhibe este componente del balance hidrogeológico sigue las tendencias espaciales de la precipitación y, en menor medida, está

condicionada por la capacidad de infiltración de los materiales superficiales. El mayor índice de recarga directa que se determinó corresponde al frente de la Sierra Madre Oriental (SMO), cuyos valores son del orden de 450 mm/año. Con ello se concluye que, aunque el método empleado brinda resultados aceptables considerando la situación hidrogeológica de la región, se recomienda el empleo de métodos físicos, de trazadores y modelación numérica, los cuales permiten determinar la recarga en diferentes escalas espaciales y temporales.

Es importante señalar que se requieren de más estudios para evaluar la capacidad de infiltración en los tipos y usos de suelos en la región de Linares-Hualahuises, con la finalidad de conocer y determinar los mecanismos de infiltración en la zona no saturada.

1.4. Enfoque del trabajo de investigación

Con base al análisis de los estudios realizados en la presente investigación se concluye que, es de vital importancia la aplicación de métodos directos en campo y la estandarización de los parámetros a evaluar para determinar el potencial de infiltración en los distintos tipos y usos de suelos. Información que servirá como herramienta para la futura toma de decisiones encaminadas a optimizar la gestión del agua dulce disponible para la población humana. Es importante señalar que se requieren de más estudios para evaluar los diferentes tipos y usos de suelos en la región de Linares-Hualahuises, con la finalidad de conocer y determinar la interacción de estos con drenaje superficial en la zona no saturada.

La infiltración es el primer mecanismo que tiene lugar en el ámbito de las aguas subterráneas (particularmente en la zona no saturada). Sin embargo, se desconoce el papel y la importancia que juegan los factores que la determinan. Estos factores pueden ser el tipo de suelo, grado de pendiente del terreno, la compactación, el nivel de saturación del suelo, la porosidad y permeabilidad del suelo, clasificación granulométrica, así como la presencia de grietas, raíces de plantas, etc., De acuerdo con la información anterior se plantea la siguiente hipótesis, así como el objetivo principal y sus metas:

1.5. Hipótesis

El uso de suelo es el factor más importante para determinar la tasa de infiltración de los suelos de la región de Linares-Hualahuises, Nuevo León.

1.6. Objetivos

a).- Determinar y analizar la capacidad de infiltración de los suelos en la región de Linares-Hualahuises, Nuevo León.

b).- Investigar los principales factores que intervienen en el fenómeno de infiltración.

1.7. Metas

1. Recopilar información geológica, hidrogeológica, edafológica disponible en la región de estudio.
2. Construcción de un infiltrómetro de doble anillo de tipo inundador, y calibración de este en el campus de la Facultad de Ciencias de la Tierra, U.A.N.L.
3. Evaluar en campo las tasas de infiltración del agua en los diferentes tipos de suelo (feozem, fluvisol, litosol, luvisol, regosol, rendzina, vertisol y xerosol) y bajo distintas condiciones de uso (agrícola, ganadero, rural, forestal y urbano).
4. Determinar en laboratorio parámetros del suelo evaluado, tales como el contenido de humedad, la densidad y la clasificación granulométrica del suelo.
5. Aplicar análisis estadísticos para determinar si existen relaciones y dependencias de las variables analizadas.
6. Generación de mapas de potencial de infiltración en un sistema de información geográfica para la región de Linares-Hualahuises, en el caso específico de la parte baja de la Cuenca del Río Pablillo, en Nuevo León.

CAPÍTULO II

GENERALIDADES

El fenómeno de la infiltración del agua en el suelo es uno de los procesos más importantes del ciclo hidrológico que repercute en forma considerable en la productividad y sostenibilidad de la agricultura, ya que su reducción conduce a efectos no deseados tales como el incremento de la escorrentía superficial, la erosión hídrica del suelo y la disminución de las tasas de recarga del agua en el suelo (Amézketa *et al.*, 2002).

2.1. Localización del área de estudio

La cuenca del río Pabillo (Fig. 2.1) se encuentra ubicada en la parte centro-sur del estado de Nuevo León, México, entre los meridianos 99°15' y 100° 00' de longitud Oeste y los paralelos 25° 00' y 24° 23' de latitud Norte (INEGI, 1983). Comprende una superficie de aproximadamente 1,741 Km² y cubre parcialmente los municipios de Linares, Hualahuises e Iturbide (Moctezuma, 2011).

El área de estudio se localiza en la parte baja de la cuenca del Río Pabillo, en la porción sur oriental del estado de Nuevo León, entre los paralelos 24°40' y 25°00' de latitud norte y los meridianos 99°20' y 99°50' de longitud oeste. Comprende totalmente al municipio de Hualahuises y parcialmente al municipio de Linares (Fig. 2.2). Se encuentra comunicada por la carretera federal No. 85, que une a las poblaciones de Linares y Hualahuises, dirigiéndose en la parte norte hacia Monterrey, Nuevo León, y en la parte sur hacia Ciudad Victoria, Tamaulipas. Hacia el poniente de Linares, la carretera estatal No. 58, facilita la comunicación de la población con los municipios de Iturbide y Galeana, Nuevo León. Existen además una gran cantidad de caminos de terracería que comunican a las cabeceras municipales con las comunidades rurales (Gobierno del Estado de Nuevo León, 2005; Moreno, 2009).

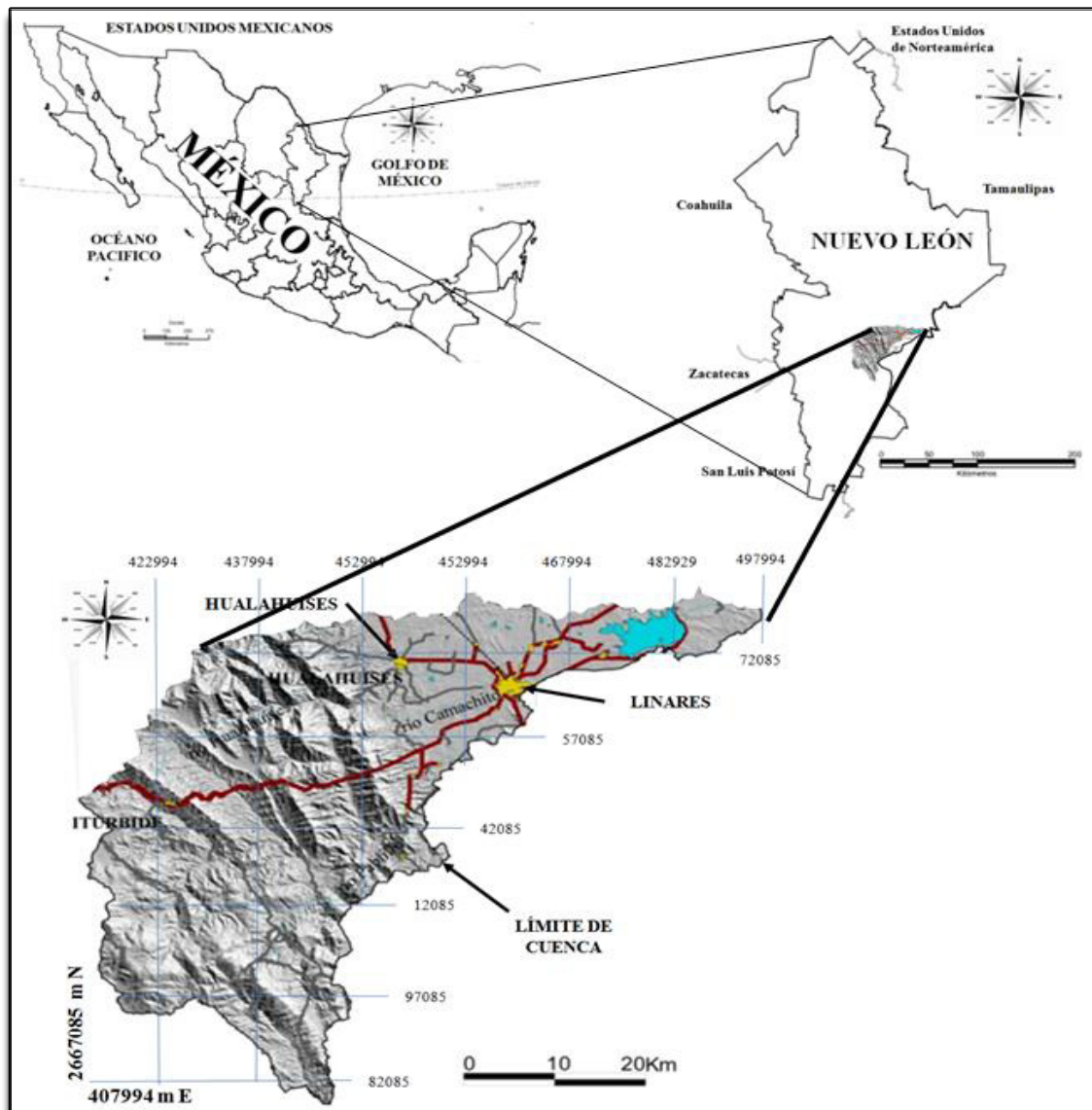


Figura 2. 1. Localización de la Cuenca del Río Pabillón, cubriendo parcialmente los municipios de Linares e Iturbide (modificado de Moctezuma, 2011).

En lo correspondiente a la población, en el municipio de Hualahuises no se ha experimentado un crecimiento demográfico rápido según lo demuestran los censos de los últimos años con 4,342 habitantes para 1980 y 6,914 para 2010. Por otra parte, el municipio de Linares para el año de 1980 contaba con una población de 33,012 habitantes, mientras que para el año 2010, su número se incrementó a 78,669 (INEGI, 2010).

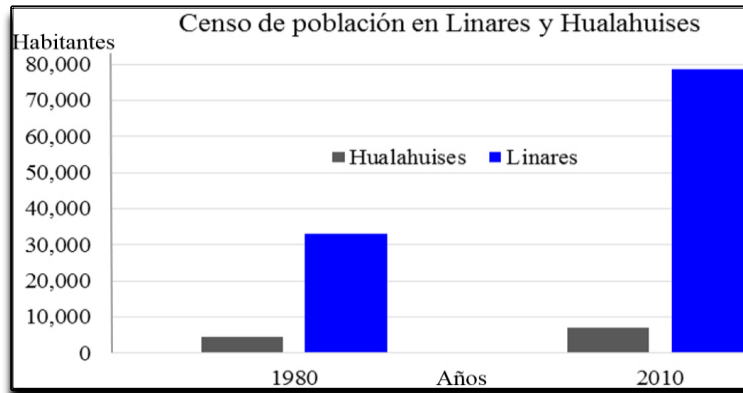


Figura 2.2. Censo poblacional de los municipios de Hualahuis y Linares, N.L. en 1980 y 2010 (INEGI, 2010).

Este acelerado incremento en la población ha traído consigo un aumento en el número y diversidad de fuentes contaminantes favoreciendo la infiltración de contaminantes hacia los mantos freáticos (Moreno, 2009).

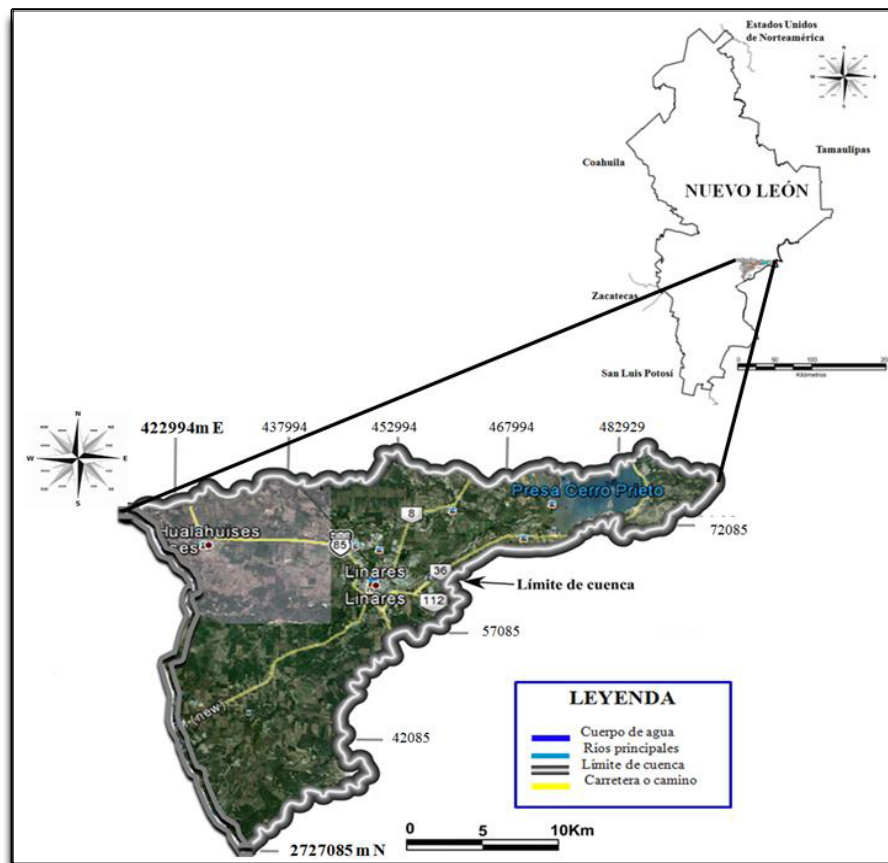


Figura 2.3. Localización de la parte baja de la Cuenca del Río Pablillo, la cual cubre principalmente los municipios de Hualahuis y Linares (imagen modificada de Google Earth, 2014).

2.2. Fisiografía

El área de la cuenca del Río Pabillo (Fig. 1) queda comprendida dentro de dos sub-provincias fisiográficas: La Sub-provincia de Llanuras y Lomeríos que corresponde a la Planicie Costera del Golfo de México (PCGM) y la Sub-provincia Sierra Alta perteneciente a la Provincia de la Sierra Madre Oriental (SMOr) (INEGI, 1981). En la PCGM afloran rocas de origen marino del Cretácico Superior, las cuales están cubiertas por sedimentos continentales del Terciario y Cuaternario (López-Ramos, 1980). El área de estudio comprende una porción de la Sub-provincia de Llanuras y Lomeríos correspondientes a la Planicie Costera del Golfo de México.

2.3. Orografía

Se presenta una topografía moderada, conformada principalmente por lomeríos suaves y valles de extensiones considerables, cubiertos por sedimentos de origen aluvial, formando terrazas de material no consolidado. Las alturas varían desde 500 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.) al pie de la SMOr, hasta el nivel del mar; al frente de la SMOr existe una serie de plegamientos convergentes hacia al NE, producto de la Orogenia Laramide, los cuales se hacen más suaves dentro de la PCGM, donde tuvo lugar la depositación de sedimentos terrígenos formando diferentes unidades litológicas en el Cenozoico. Las zonas abruptas de relieve se localizan en las cercanías de la SMOr, (la cual tiene una longitud >800 km y entre 80 y 100 km de ancho, se caracteriza por presentar cadenas montañosas que alcanzan altitudes de hasta 3,600 m.s.n.m., aunque en promedio son aproximadamente 2,000 m.s.n.m.); esta consiste de plegamientos de rocas sedimentarias marinas, cuya edad varía desde el Mesozoico al Terciario (Eoceno Superior), alternando con valles de origen aluvial resultado de la erosión (Galván-Mancillas, 1996; López-Ramos, 1980; Padilla y Sánchez, 1985).

Por otro lado Moreno Esparza (2009) determinó pendientes muy suaves en el rango de 2 al 12%. Los terrenos de baja o nula pendiente son propicios para que ocurra el fenómeno de infiltración, favoreciendo así el movimiento de contaminantes desde la superficie, ocurren en las zonas de relleno de sedimentos aluviales, un claro ejemplo es en la Hacienda Las Moras, localizado en el municipio de Hualahuises (con pendiente nula), en las cimas de las terrazas y en las planicies aguas abajo de la presa Cerro Prieto, en el ejido Los Leones. Por el contrario, en sitios donde la pendiente es abrupta, la escorrentía tiende a ser el fenómeno dominante, limitando la infiltración de agua superficial y por ende, de potenciales contaminantes, las mayores pendientes se presentan en las barrancas, en los márgenes de los ríos y de las terrazas, por ejemplo en el ejido El Alfarero y en el rancho San Luisito, en el municipio de Linares (con una pendiente $\approx 12\%$).

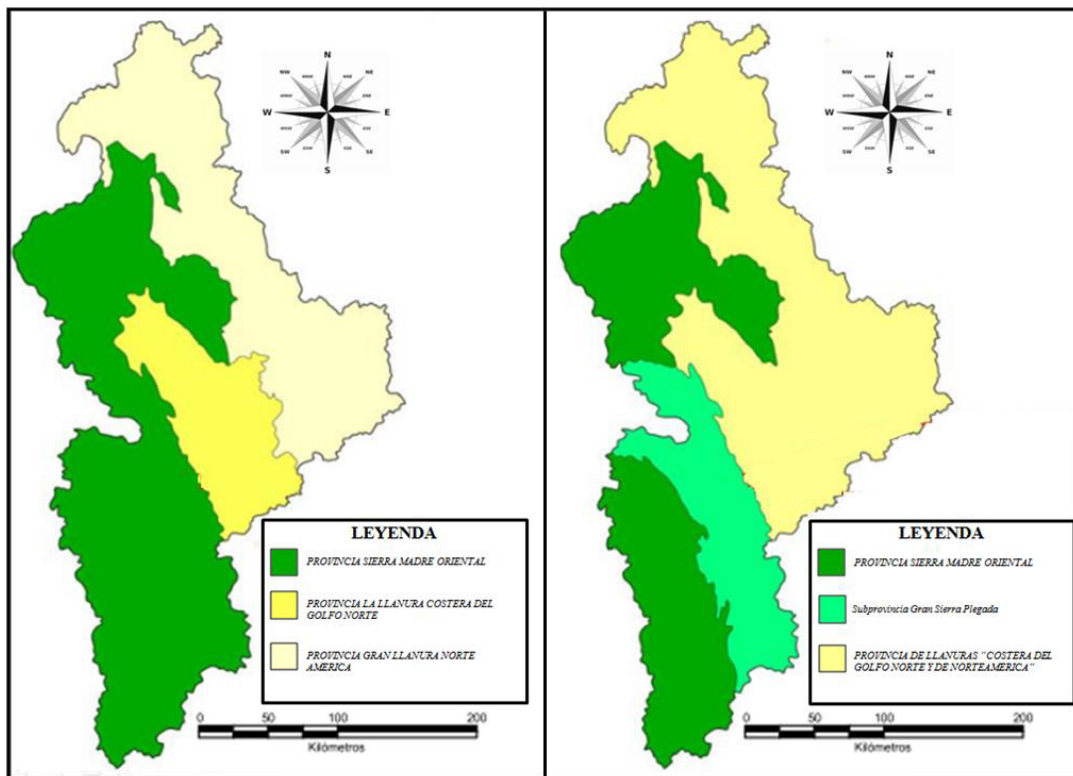


Figura 2. 4. Mapas Fisiográficos que indica las Provincias Fisiográficas (izq.) y también la Subprovincia “Gran Sierra Plegada” (der.) del Estado de Nuevo León (INEGI, 1981).

2.4. Geomorfología

Las características morfológicas de una cuenca están determinadas principalmente por factores del tipo geológico, climatológico y topográfico. Entre los factores del tipo geológico están el contenido de minerales solubles que componen las rocas, la configuración de elementos litológicos y estructurales con diferentes permeabilidades (estratificación, lenticularidad, fallas, fracturas, certificación y el grado de anisotropía).

Los de tipo climático son el régimen de las temperaturas, la cantidad, tipo y variación estacional de la precipitación y el potencial de evaporación. El factor topográfico, es decir la magnitud y distribución de la pendiente del terreno, dependen en gran medida de la madurez geomorfológica del paisaje, determinada por el tamaño y la forma de las depresiones topográficas y prominencias (Tóth, 1999).

Las principales características físicas que se consideran para determinar la morfología de la cuenca son: Los parámetros de forma (para conocer el tipo de cuenca a la que pertenece), parámetros de relieve (el cual, determina el porcentaje de pendiente) y los parámetros relativos a la red de drenaje, correspondiente a las direcciones de los flujos de agua principales (Díaz-Delgado *et al.*, 2005). Es importante señalar que los valores no tienen unidades.

2.5. Hidrografía

La cuenca del río Pabillo pertenece a la cuenca del río San Fernando, comprendida en la Región Hidrológica RH-25, denominada San Fernando - Soto La Marina, cuyos afluentes principales desembocan en la vertiente del Golfo de México. Está limitada al norte con la sub-cuenca del río Potosí, al este con la sub-cuenca del río Conchos, ambas pertenecientes a la cuenca del río San Fernando, al sur con la sub-cuenca del río Soto La Marina y al oeste con la Región hidrológica del río Salado (INEGI, 1983). El drenaje se

presenta en dos patrones diferentes; dentro de la SMOr es principalmente del tipo rectangular enrejado en las pendientes de las montañas y solamente en el extremo occidental de la cuenca ocurren patrones detríticos. En la planicie, al oriente de la cuenca, las corrientes forman patrones de tipo dendrítico sub-paralelo con una baja disección del relieve. En esta porción los arroyos son en su mayoría de tipo intermitente.

En la cuenca la corriente principal pertenece al río Pablillo, el cual nace a unos 16 km al sureste del poblado de Galeana, entre los cerros Pablillo e Infiernillo a 3,167 m.s.n.m. este río corre con dirección SW-NE, siguiendo su trayectoria por Linares; sus afluentes más importantes son los ríos Hualahuises y Camachito, estos en forma combinada generan a un río de corta trayectoria denominado Camacho, el cual vierte sus aguas por la margen izquierda del río Pablillo, que se unen para tener su desembocadura en la presa Cerro Prieto. Aguas abajo de la presa los excedentes y filtraciones de la misma unen con los otros afluentes como el río Potosí hasta desembocar como tributarios del Río Conchos (INEGI, 1983).

2.6. Climatología

La caracterización de la región del Noreste de México presenta un clima semi-árido subtropical, muy extremo, con veranos cálidos y ocasionales nevadas en invierno. La temperatura media anual es de 22°C. Alrededor del 80% de la precipitación se presenta durante el periodo de mayo a octubre, la precipitación media anual es de 805 mm (Návar y Synnott, 2000). La cuenca del río Pablillo está representada por dos grupos climáticos de acuerdo a la clasificación de Köppen, modificada por García (1973), los cuales son: un grupo de climas templados húmedos y otro de climas secos, estos mismos que se dividen en subgrupos. Los climas que prevalecen en la sub-provincia de Llanuras y Lomeríos son los semi-cálidos sub-húmedos (A(C)), aunque en un área reducida del noreste se presenta el clima seco (BS1). Los climas semi-cálidos sub-húmedos están representados por las variantes ((A)C(W2) y ((A)C(W0)). Con respecto a la Sub-provincia de la Gran Sierra Plegada, esta presenta una distribución climática compleja, ya que existen diversos tipos de climas: secos

extremosos, semi-secos semi-cálidos (BS1) y templados (C). La distribución de ambos grupos de climas está determinada por el descenso gradual de altitud hacia el oriente, en el caso del primer grupo y para el segundo grupo, esta distribución está condicionada por los grandes contrastes de alturas en la SMOr (Návar y Synnott, 2000).

2.7. Vegetación

La vegetación predominante en la Subprovincia de Llanuras y Lomeríos es el matorral tamaulipeco (debido a que existen condiciones de aridez). En la provincia de la SMOr, la estructura de la vegetación cambia conforme a las variaciones del clima (esta se ve afectada por las variaciones de altitud). En sus laderas se encuentra el matorral submontano, matorral desértico rosetófilo y submontano y chaparral, conforme se asciende se encuentran los bosques de encino y pino (INEGI, 1981).

2.8. Tipos de suelo

En la parte baja de la cuenca del río Pablillo en el frente de la SMOr sobresale por tener regosoles y luvisoles, mientras que en la región de la cuenca que corresponde a la PCGM, predominan los vertisoles, aunque también se presentan feozems, fluvisol, xerosoles, litosoles y rendzinas (INEGI, 1981), todos estos se describen a continuación:

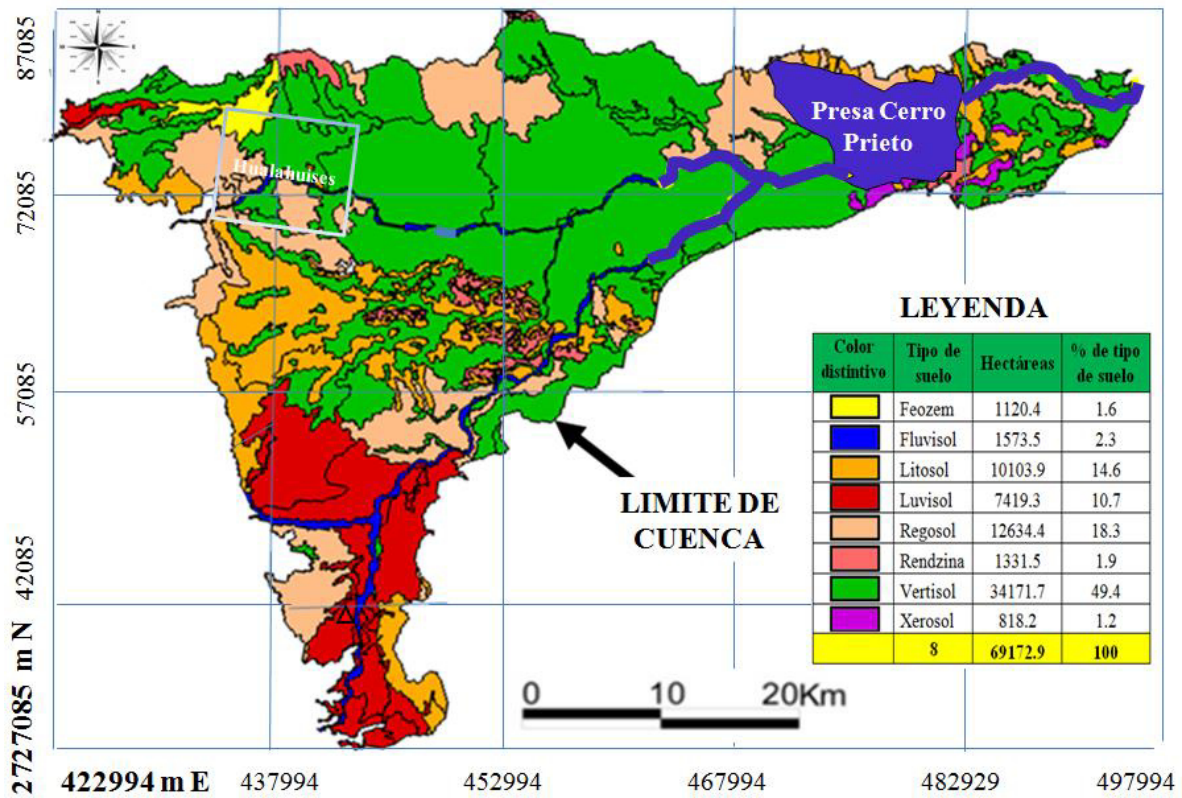


Figura 2. 5. Localización de los suelos en la parte baja de la Cuenca del Río Pabillón, la cual cubre principalmente los municipios de Hualahuis y Linares.

CAPÍTULO III FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1. El concepto de infiltración

Custodio y Llamas (1976), definen el proceso de infiltración como la entrada de agua, generalmente vertical, a través del terreno, procedente de algún evento de lluvia, riego o de una corriente de agua sobre la superficie del suelo. Con el agua penetran en el suelo las sustancias que lleva disueltas y en suspensión. Superada la capacidad de campo del suelo (máxima cantidad de agua que el suelo puede retener), el agua descende por la acción conjunta de las fuerzas capilares y de la gravedad (Fig. 3.1).

En el proceso de infiltración de agua en los suelos influye en el sistema natural en las escalas espacial y temporal que son partes importantes como a continuación se describen:

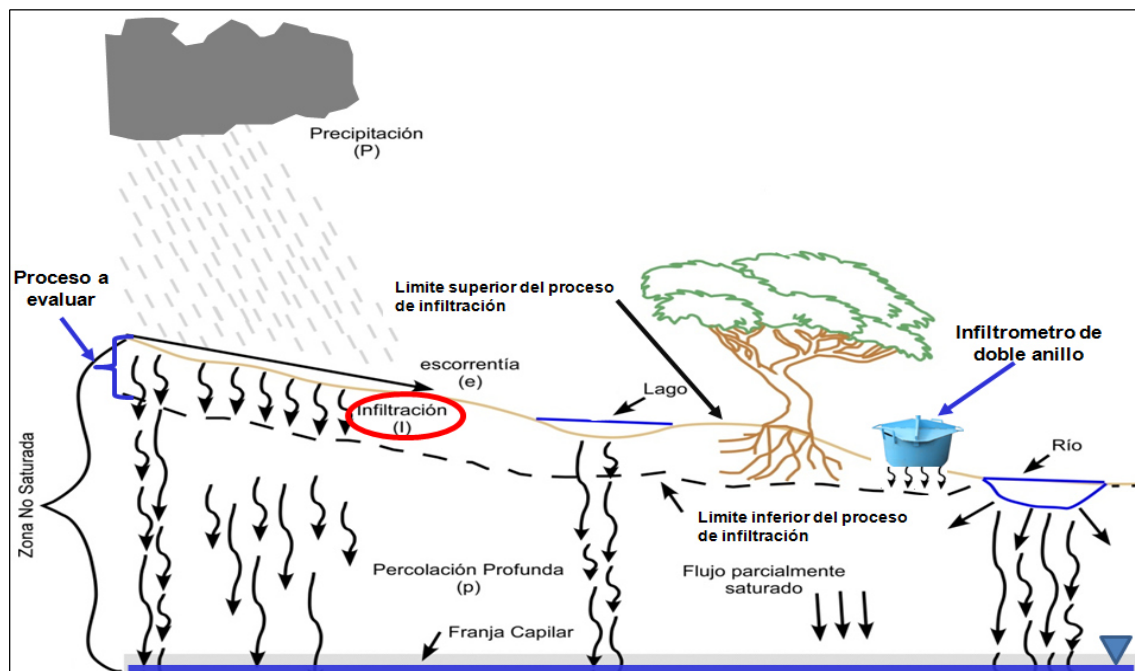


Figura 3. 1. La infiltración en relación con otros procesos que se desarrollan en los suelos (modificada de Moctezuma, 2011).

3.2. Evolución histórica del concepto de infiltración

Los romanos pensaban que las precipitaciones en forma de agua eran suficientes para alimentar los depósitos y manantiales de agua subterránea. Marco Vitrubio (15 a.C.) comenzó a difundir esta teoría para analizar la existencia del ciclo hidrológico como se contempla actualmente. En cambio, Lucio Anneo Séneca (4 a.C.-65 d.C.) vuelve a la teoría aristotélica concluyendo que el agua de lluvia no es suficiente para alimentar las fuentes subterráneas. Bernard Palissy (1509-1589), filósofo francés, parece ser el primero en establecer la teoría sobre el origen de las aguas subterráneas, proponiendo "La teoría de la infiltración", la cual es la única, firme y universalmente aceptada en la actualidad. La comprobación de la teoría mediante medidas experimentales directas parece haber sido atribuida a Pierre Perrault (1608-1680) y Edmé Mariotte (1620-1684), que midieron la precipitación en la cuenca del Sena durante los años 1668 a 1670 y observaron que la escorrentía de la cuenca era solamente un sexto de la precipitación total, deduciendo, por tanto, que casi la totalidad del resto alimentaba los depósitos y fuentes subterráneas (Deming, 2002; modificado de Espinoza, 2004).

3.3. Escala espacial

La variación espacial está determinada por los tipos de clima, suelo y la vegetación que se encuentra presente de un sitio a otro (Fig. 3.2).

En los suelos arcillosos, el espacio de los poros conectados es muy pequeño y esto se traduce en una baja permeabilidad. Los suelos en las regiones áridas pueden presentar mayor contenido de arenas y esto permite mayores volúmenes de infiltración. Especialmente en regiones áridas como por ejemplo al sur de la India, se estimó la recarga usando información de suelos y su uso, los resultados indicaron que bajo prácticas agrícolas la tasa de recarga era de 70 mm/año y concluyeron que la recarga es más afectada por el tipo de suelo que por el tipo de uso (Anuraga *et al.*, 2006). También se ha demostrado que los sistemas radiculares

(principalmente cortos) de las plantas son otro factor importante que permite que una mayor cantidad del agua sea infiltrada y posteriormente sea transformada en percolación (Allison *et al.*, 1990).

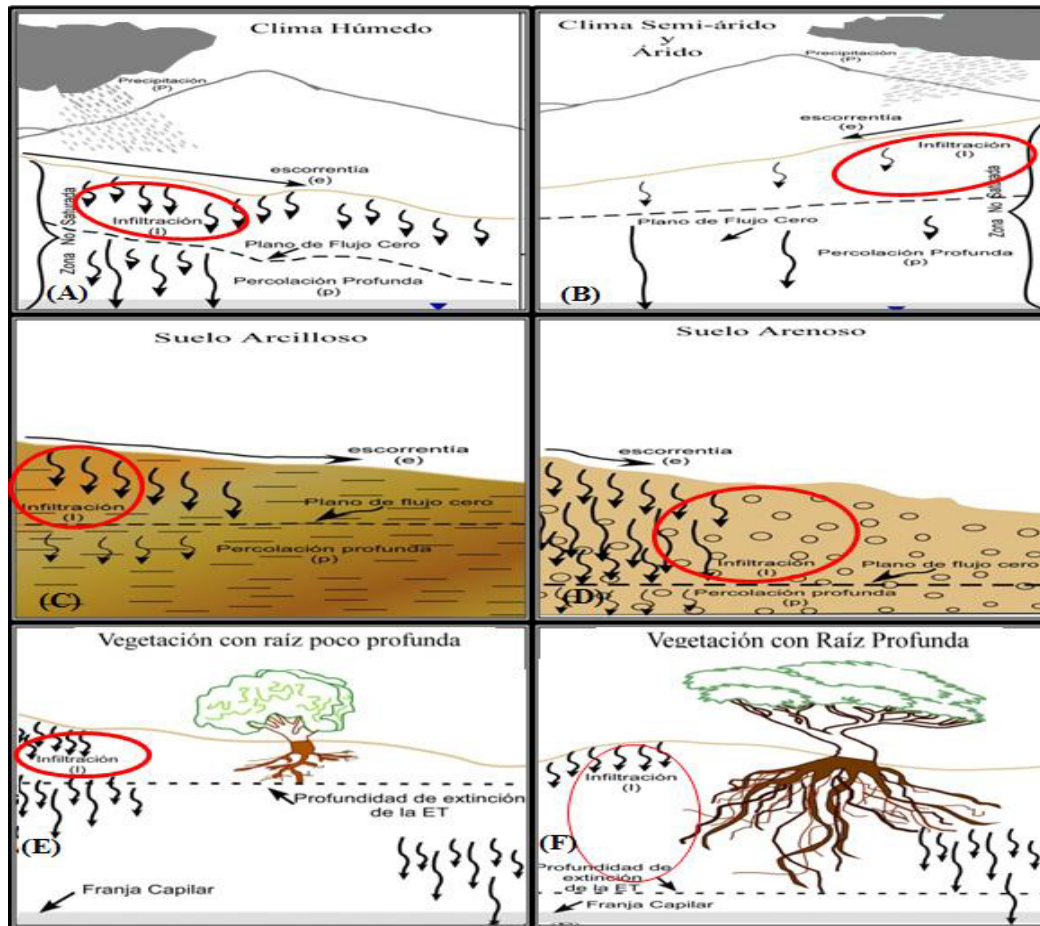


Figura 3. 2. La variabilidad de la infiltración depende principalmente del clima, suelo, la vegetación y la pendiente del terreno (A) En el clima húmedo el nivel freático es somero debido a las altas precipitaciones, altas tasas de infiltración y escorrentía. (B) En el clima semiárido y árido el nivel freático es profundo debido a las bajas precipitaciones, bajas tasas de infiltración y escorrentía. La percolación profunda tiene trayectorias largas. (C) En suelos arcillosos la capacidad de infiltración es baja y se favorece la escorrentía. La percolación es profunda. (D) En suelos arenosos la capacidad de infiltración es alta y desfavorece la escorrentía. La percolación es somera (E) Las raíces poco profundas de la vegetación permiten que buena parte del volumen infiltrado sea transformado en percolación hacia zonas más profundas (profundidad de extinción de la ET somera), (F) La vegetación con raíces profundas extiende la influencia para que el agua de infiltración regrese a la superficie en forma de evapotranspiración, reduciéndose las trayectorias de percolación (modificado de Moctezuma, 2011).

3.4. Escala temporal

Para la estimación de la infiltración hay que tomar en cuenta la variabilidad temporal y espacial. Los factores determinantes en la variabilidad temporal son: la precipitación, las características de los suelos y la vegetación.

La precipitación tiene incidencia en la infiltración ya que va a depender de la cantidad y duración de la precipitación pero sobre todo de la intensidad. Conforme a mayor altitud aumentan más las precipitaciones, ya que a medida que las masas de aire ascienden se enfrían y favorecen la condensación del agua y la producción de lluvias. La distancia al mar influye de manera que las zonas costeras reciben más precipitaciones que las zonas interiores porque el aire está mucho más cargado de humedad y por lo tanto precipita en forma de lluvia. Una precipitación moderada de larga duración favorece la infiltración. Las precipitaciones intensas saturan muy rápidamente el suelo, perdiéndose gran parte de éstas en escorrentías superficiales y causan erosión (Moctezuma, 2011), la precipitación misma tiene asociada una gran incertidumbre en términos de cantidad, intensidad y lugar de ocurrencia.

3.5. Mecanismos de infiltración

Una vez que el agua penetra en el suelo esta misma empieza a acumularse y a este fenómeno se le conoce como la infiltración acumulada la cual viene siendo la cantidad de agua que se ha infiltrado por unidad de superficie de terreno en un determinado lapso de tiempo.

La velocidad de infiltración indica la tasa o velocidad a la que el agua entra en el suelo en cada instante y se define como la cantidad de agua infiltrada por unidad de superficie y de tiempo. Disminuye muy rápidamente a lo largo de los primeros momentos del proceso, partiendo de unas condiciones de suelo seco y tiende a estabilizarse a lo largo del tiempo:

Esta ecuación corresponde a la infiltración instantánea:

$$i_t = \frac{dI(t)}{dt} \quad (3.1)$$

donde:

- i_t = Velocidad de infiltración (mm/h)
- dI = Agua infiltrada por unidad de superficie (mm/cm²)
- dt = Tiempo (h)
- $I(t)$ = Tasa de infiltración (mm/año)

La ecuación de la infiltración acumulada es:

$$I(t) = \int_0^t Ii(t)dt \quad (3.2)$$

donde:

- $I(t)$ = Tasa de infiltración (mm/año)
- I = Infiltración (mm/cm²)
- i = Velocidad de infiltración (mm/h)
- t = Tiempo en un instante dado (seg)
- dt = Tiempo (h)

La velocidad de infiltración media es la cantidad de agua infiltrada acumulada por unidad de superficie a lo largo del tiempo que ha durado el proceso:

$$i_m = \frac{\sum Q}{A \sum t} = \frac{I(t)}{T} \quad (3.3)$$

donde:

- i_m = Infiltración media (mm³/h)
- Q = Agua acumulada (mm³)
- A = Superficie (cm²)
- t = Tiempo en un instante dado (seg)
- T = Tiempo total (h)

La velocidad de infiltración básica o final es la velocidad de infiltración que corresponde a un conjunto de leyes físicas que provocan que el fenómeno tienda a estabilizarse.

Cada tipo de suelo tiene una capacidad de infiltración característica que depende de sus propiedades intrínsecas, pero también del manejo del suelo y del agua de riego, así como de agentes climáticos como la lluvia y el viento. La caracterización de la tasa de infiltración de los suelos es fundamental para cuantificar la susceptibilidad de los suelos al sellado superficial o encroscamiento y estimar ciertas propiedades físicas del suelo tales como la distribución del tamaño de poro o el transporte de agua y solutos (Reynolds y Elrick, 1990; Wang *et al.*, 1998; Angulo-Jaramillo *et al.*, 2000).

3.6. Factores que intervienen en la infiltración

En las áreas semiáridas, la infiltración está controlada principalmente por la pendiente de la superficie, la cobertura vegetal, las características de la lluvia, el uso del suelo, el contenido de humedad del suelo y la humedad relativa. A continuación se describen los principales factores que afectan la infiltración en una cuenca los cuales, de acuerdo a Williams y Balling (1996) pueden agruparse en:

3.6.1. Factores meteorológicos

Los factores meteorológicos que influyen en el proceso de infiltración, incluyen las características de la precipitación y la temperatura. Williams y Balling (1996) mencionan que cuando ocurre un evento de precipitación muy intensa, las gotas de lluvia compactan el terreno, lo que disminuye la infiltración, este efecto es atenuado por la vegetación. Mientras que, conforme menor sea la temperatura del ambiental, menor será la temperatura del suelo, pudiéndose congelar el agua que lo contiene, lo que produce una disminución en la infiltración. También hay que considerar el efecto de la temperatura sobre la viscosidad del

agua, de manera que al bajar la temperatura aumenta la viscosidad del agua y esto puede afectar la infiltración.

3.6.2. Características pedológicas

Entre las características pedológicas que influyen en el proceso de infiltración, podemos mencionar las siguientes:

(a) Estado de la superficie del suelo

Sánchez (1984) por su parte define el estado de la superficie de suelo como rugosidad, refiriéndose a las depresiones que presenta el micro relieve, si la superficie del suelo es rugosa, la porosidad del suelo, los cambios de lugar del agua libre de la superficie y la infiltración, se presentan en un periodo de tiempo relativamente corto por la existencia de un camino abierto en el sistema de macro poros. En contraste, si la superficie es plana, los cambios de la porosidad en la superficie impiden en gran manera una infiltración más rápida, siendo esta relativamente pequeña por la presencia de un camino angosto y tortuoso del sistema de poros.

(b) Textura del suelo

La textura de suelo se refiere a la composición física de un suelo, es decir al porcentaje con el que se presentan los diversos materiales constitutivos (de arcilla, limo y arena) de un suelo. La textura del terreno influye por sí y por la influencia en la estabilidad de la estructura, tanto menor cuanto mayor sea la proporción de materiales finos contenga. Esta propiedad influye considerablemente en la infiltración del agua; en términos generales se puede decir que a mayor diámetro de las partículas de suelo, mayor infiltración, (Torres, 2001), considerando lo anterior se puede mencionar que a mayor clase de textura mayor compactación y por lo tanto, menor infiltración (Figura 3.3).

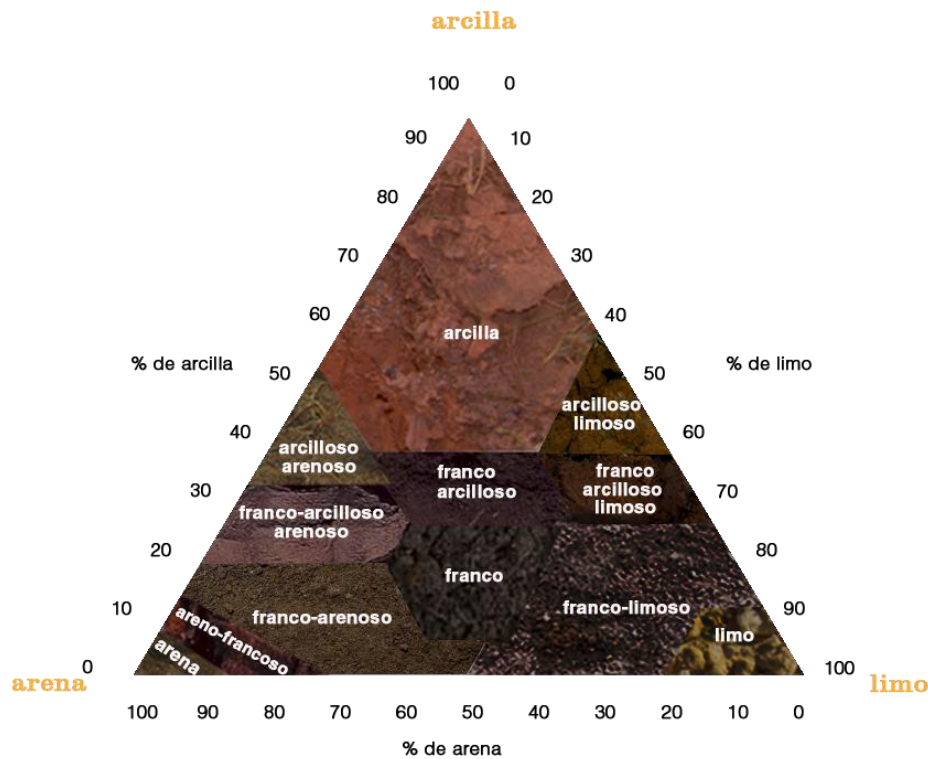


Figura 3. 3. Triángulo de texturas del sistema USDA (Agricultura ecológica, 2013).

(c) Perfil del suelo (estratos de diferentes tipos de suelo)

Los perfiles del suelo formados naturalmente son raramente homogéneos, más bien contienen distintas capas u horizontes con características hidráulicas y físicas específicas. La presencia de estas capas en el perfil del suelo generalmente retarda el movimiento de agua durante la infiltración. Las capas de arcilla retardan el flujo debido a su baja permeabilidad; sin embargo, cuando estas capas están próximas a la superficie e inicialmente muy secas, la velocidad de infiltración inicial es muy alta y luego decae rápidamente (*wettability*). En la arena, el agua tiende a fluir con mayor velocidad (que en las capas de arcilla) debido a que el tamaño del poro es mayor, sin embargo en condiciones de saturación (o casi de saturación), los suelos de textura gruesa presenta una mayor conductividad, como consecuencia del mayor tamaño de sus poros, que permiten una más fácil transmisión del agua y como consecuencia una mayor infiltración.

La superficie del suelo también actúa como una barrera hidráulica para la infiltración debido a la permeabilidad cerca de la superficie, que reduce la infiltración inicial y el eventual logro de una infiltración constante (Jara y Valenzuela, 2002).

(d) Porosidad del suelo

El sistema de poros del suelo impacta directamente sobre el balance de agua (entradas y salidas del sistema), en el funcionamiento hídrico (relaciones de agua-suelo), en la entrada, difusión de gases y calor. El hecho de que un material sea poroso no significa necesariamente, que pueda darse una infiltración alta, para que esta se dé es necesario que los poros estén intercomunicados entre sí, es decir que el material sea permeable. Sin embargo no es solamente la cantidad total de poros en el sólido lo que define el comportamiento hídrico del suelo, sino también las características específicas del sistema de poros, en términos de forma, tamaño y distribución (Williams y Ouyang, 1998).

Cuando el agua se transmite a través de los poros, el flujo que circula será proporcional al diámetro de los poros, disminuyendo conforme los diámetros se reducen, pero esta disminución de velocidad, aunado del efecto geométrico, es aun en mayor grado para los pequeños poros, debido a que la movilidad de las moléculas de agua unidas a las partículas sólidas, es muy baja por los efectos de adsorción (Forsythe, 1975).

(e) Flujo en los macroporos del suelo

Anderson y Burt (1990) mencionan que en los suelos, existen conductos llamados macroporos, lo cual, la presencia de estos favorece el flujo sub-superficial y en suelos arcillosos (que desarrollan grietas o donde las raíces dejan huecos) el flujo en los macroporos es de gran importancia. Beven y Germann (1982) menciona 4 grupos de macroporos: (i) poros formados por la fauna del suelo; (ii) poros formados por las raíces de las plantas; (iii) fisuras y grietas, y (iv) pseudos-tubos. Clothier y White (1981) llaman macroporos a los poros que son mayores que $750 \mu\text{m}$ en diámetro. También clasificaron a los poros del suelo en tres



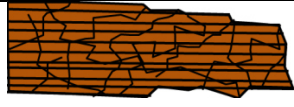

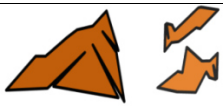

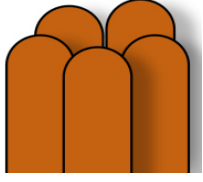
clases: (I).- macroporos ($> 1\ 000\ \mu\text{m}$), (II).- mesoporos ($10 - 1\ 000\ \mu\text{m}$), y (III).- los microporos ($< 10\ \mu\text{m}$). Watson y Luxmoore (1986) concluyeron que los macroporos pueden conducir más del 70 % del agua total bajo condiciones de saturación ya que exhiben grandes conductividades hidráulicas. Ward y Robinson (2000) mencionan que la importancia de los macroporos depende más del grado de interconectividad entre ellos y de su continuidad, que de su abundancia.

Una cualidad distintiva de los macroporos es que el agua que se conduce por ellos puede evitar quedarse en todo el perfil del suelo y migrar rápidamente al nivel freático. Si la intensidad de la lluvia es menor que la capacidad de infiltración de los agregados del suelo, no se genera flujo en macroporos excepto cuando todos los microporos están llenos de agua. Es importante mencionar que, si el suelo está muy seco, entonces el agua que penetra en los macroporos es rápidamente retenida en los agregados del suelo (Anderson y Burt, 1990).

(f) Estructura del suelo

En lo correspondiente a la estructura del suelo se refiere al arreglo o acomodo de las partículas del suelo con respecto a las tres dimensiones del espacio, a su forma de unión y sus aglutinantes, lo cual permite conocer la discontinuidad del suelo y los espacios huecos que padece, que son conductos por donde pueden circular el agua y el aire, por ello, si se tiene un mayor desarrollo estructural (de horizontes o epipedón) se mejora la infiltración. (Pérez, 2008).

Tabla 3. 1. Tipos de estructura de suelo y sus características (Cisneros, 2003; modificado de García, 2011).

	ESTRUCTURA	CARACTERÍSTICA
a.-	Granular: relativamente no porosos; agregados pequeños (tamaño menor de 2cm de diámetro), esferoides, no ajustados a los agregados adyacentes. se localizan comúnmente en el horizonte "A".	
b.-	Migajosa: Relativamente porosos; agregados pequeños y esferoides. Se localizan comúnmente en el horizonte "A".	
c.-	Laminar: Agregados similares a placas; Las placas a menudo se superponen e impiden la permeabilidad. Se encuentran generalmente en el horizonte "A2", en suelos de bosques y estratos arcillosos.	
d.-	Bloques angulares: Bloques cuyas caras angulares están bien definidas. Los agregados a menudo se rompen en bloques más pequeños. Se localizan generalmente en el horizonte "B".	
e.-	Bloques subangulares: Gránulos similares a bloques limitados por otros agregados, cuyas caras angulares redondeadas forman el molde del gránulo. Se localizan generalmente en el horizonte "B".	
f.-	Prismática: Agregados similares a columnas con las partes superiores no redondeadas. Algunos agregados prismáticos se rompen en pedruzcos más pequeños. Se localiza generalmente en el horizonte "B".	
g.-	Columnar: En estas las dimensiones verticales de los agregados en posición natural son mayores que sus dimensiones horizontales. Las columnas están separadas por grietas verticales y generalmente quebradas por grietas horizontales. Las cabezas de las columnas son redondeadas y se encuentran muy a menudo en el horizonte "B" en los suelos alcalinos (Sódicos).	

En las estructuras en un suelo se presentan características específicas en relación con otras propiedades físicas, entre las más importantes se encuentran la infiltración. Las siguientes figuras describen la relación que tiene la estructura con la infiltración.

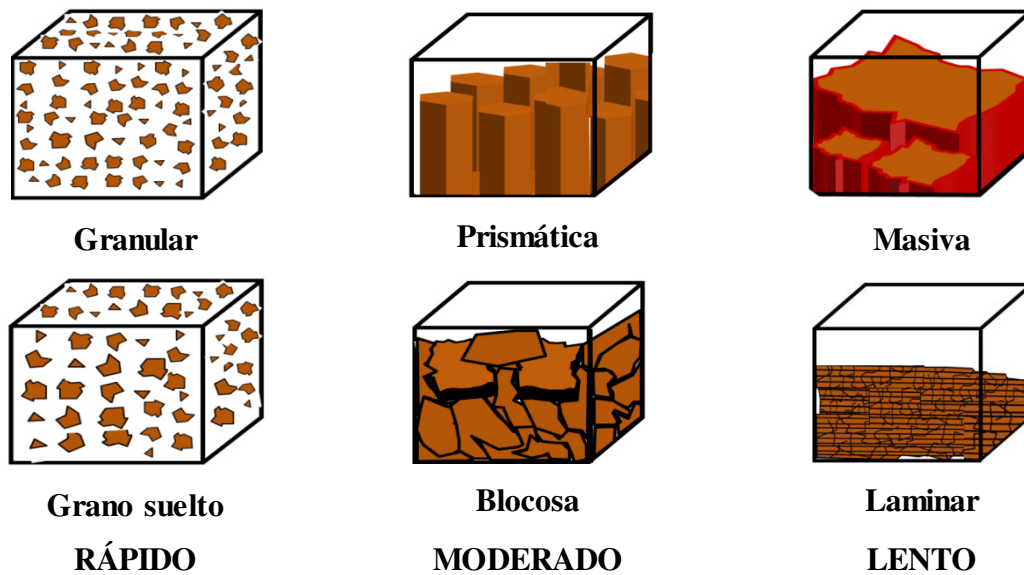


Figura 3.4. Efecto de algunas estructura del suelo sobre la velocidad de infiltración (Cisneros, 2003; modificado de García, 2011).

(g) Horizontes y capas maestras de suelo

El sistema de clasificación de suelo (Soil Survey Staff, SSS, 1999) define 6 horizontes o capas maestras en el suelo, los cuales simboliza con las letras mayúsculas: **O, A, E, B, C** y **R**. Recientemente, el Soil Survey Staff adicionó el símbolo **W** a la lista anterior para indicar la presencia de capas de agua dentro del suelo; este símbolo no se usa para capas de agua, hielo o nieve que estén sobre la superficie del suelo. Jaramillo (2002), contempla 6 horizontes maestros principales y 3 mezclados con las siguientes características:

Tabla 3.2. Principales horizontes en el suelo definidos por el Soil Survey Staff (SSS, 1999).

Horizonte o capa	Características
O	Son porciones del suelo dominadas por materiales orgánicos; no importa el grado de descomposición que tengan dichos materiales orgánicos para merecer el símbolo O. Generalmente, ellos se encuentran en la superficie de suelos.
A	Horizonte mineral que se encuentran en la superficie del terreno o por debajo de un horizonte o capa O, y presentan: (i) Acumulación de materia orgánica humificada, íntimamente mezclada con la fracción mineral del suelo y/o (ii) Propiedades resultantes de actividades de distribución como laboreo, pastoreo, etc.

E	Horizonte mineral que se caracteriza por presentar pérdidas de arcillas y/o sesquióxidos de Fe y Al, generando una acumulación de partículas de arena y limo; generalmente está debajo de horizontes o capas O y A y sobre horizontes B.
B	Horizonte mineral que se desarrolla por debajo de alguno de los horizontes descritos anteriormente. En éstos se ha perdido casi todo vestigio de la estructura original del material parental y se observa alguno de los siguientes rasgos pedológicos, solo o combinado con otros: (i) Acumulación aluvial de arcillas, hierro, aluminio, humus, carbonatos, yeso y/o sílice, (ii) Remoción de carbonatos, (iii) Formación de arcilla y/o liberación de óxidos y (iv) Formación de estructura prismática, blocosa o granular.
C	Horizontes que han sido muy poco afectados por procesos pedogenéticos; en las capas C se incluyen sedimentos y fragmentos de roca poco consolidados, en este mismo se incluyen aquellas porciones del suelo que tienen acumulaciones de sílice, carbonatos, yeso o sales más solubles, aún endurecidas.
R	Este concepto se reserva para las rocas duras, las cuales dificultan excesivamente su excavación, aunque pueden ser fragmentadas con equipos pesados.

Horizontes o capas conformadas de diversos horizontes; De acuerdo con la forma en que se combinan las propiedades, el SSDS (1993) define los horizontes transicionales y los mezclados con las siguientes características:

Tabla 3.3. Horizontes o capas maestros con propiedades combinadas en el suelo definidos por el Soil Survey Staff (SSS, 1999).

Horizonte o capa	Características
Combinados	Son porciones de características de dos horizontes o capas diferentes; esta porción del suelo no puede identificarse con una sola letra (como en los horizontes maestros simples), sino que debe recurrirse a la mezcla de dos letras mayúsculas para hacerlo.
Transicionales	Horizontes dominados por las propiedades de alguno de los horizontes maestros, pero con propiedades subordinadas de otro; se simbolizan con dos letras mayúsculas, la primera indica el horizonte maestro con características dominantes; la segunda letra indica el horizonte maestro que aporta las demás características del horizonte; ejemplo; AB, BA, EB, BE, BC y CB.
Mezclados	Son aquellos en los cuales hay porciones específicas de un horizonte rodeadas por porciones de otro horizonte maestro. Se simbolizan por una fracción de dos letras mayúsculas, en la cual el numerador indica el horizonte maestro cuyas propiedades ocupan el mayor volumen del horizonte mezclado y, la del denominador, indica el horizonte que aporta menos volumen a aquel; por ejemplo, en un horizonte A/B, las propiedades del horizonte A ocupan más espacio que las del B, dentro del horizonte A/B.

(h) Conductividad hidráulica de los horizontes

La conductividad hidráulica del suelo se ha señalado como un parámetro esencial en la determinación cuantitativa del movimiento del agua en el suelo y, consecuentemente para solucionar problemas relacionados al drenaje, recarga y conservación del suelo. La conductividad hidráulica es disminuida por la textura y estructura del suelo, siendo mayor en suelos altamente porosos, fracturados o agregados y menor en suelos densos y compactos (Forsythe, 1975).

La conductividad hidráulica representa la mayor o menor facilidad con que el medio deja pasar el agua a través de él por unidad de área transversal a la dirección del flujo, tiene las dimensiones de una velocidad y varía tanto espacial como temporalmente. De acuerdo con Salgado (1999) la conductividad hidráulica varía especialmente debido a: a) La interacción del fluido con el medio poroso (por las características mineralógicas de las partículas y el agua que percola a través del suelo); b) el bloqueo de los poros (debido al aire atrapado y la destrucción de los agregados); c) los microorganismos (su multiplicación y la consiguiente descomposición de la materia orgánica puede obstruir los poros); d) las grietas y cavidades (resultante de la actividad de las lombrices y descomposición de las raíces) y e) la heterogeneidad del medio poroso, en el cual existen variaciones en las características físicas de distintos estratos que conducen a diferencias entre la conductividad hidráulica horizontal y vertical, considerando lo anterior se puede mencionar que a mayor conductividad es mayor la infiltración.

(i) Capacidad de infiltración

Gurovich, (1985) menciona que la capacidad de infiltración también es conocida como "infiltrabilidad del suelo", es el flujo de agua que se puede transmitir por el perfil del suelo y puede absorber a través de su superficie, cuando la presión atmosférica influye sobre el agua. Indirectamente, la infiltrabilidad determina la cantidad de agua que recarga a los cuerpos freáticos, así como también puede mantener a los ríos y arroyos con agua, cuando

está ingresa al suelo. La capacidad de infiltración en un suelo se obtiene mediante la siguiente ecuación (Martínez *et al.*, 2006);

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt \quad (3.4)$$

donde:

$F(t)$ = Máxima cantidad de agua que puede infiltrarse en el suelo (en litros) por unidad de tiempo (en min) en un instante dado

$f(t)$ = Desde el inicio del ensayo de infiltración hasta un instante genérico

t = Tiempo (min)

(j) Pendiente del terreno

La pendiente del suelo es uno de los factores geológicos de gran importancia que puede incidir directamente sobre la velocidad de infiltración. Una pendiente excesiva produce escurrimiento que impacta en la cantidad de tiempo que el agua está disponible para la infiltración. En contraste las pendientes suaves tienen menos impacto en el proceso de la infiltración debido a la disminución del escurrimiento (Williams y Ouyang 1998). Este parámetro determina en buena medida la relación entre escurrimiento e infiltración, a menor pendiente será mayor el tiempo que permanecerá el agua sobre un punto dado del terreno.

(k) Contenido inicial de humedad

La cantidad total de agua que entra en un suelo, es mayor cuando el suelo se encuentra inicialmente seco que cuando está húmedo; no obstante, la velocidad de avance del agua a lo largo del perfil del suelo es inferior en el caso de suelo seco, es decir, si el suelo tiene un porcentaje de humedad alto, la infiltración es menor que si el suelo está seco. Por esta razón precipitaciones no muy intensas, pueden producir crecientes significativas en épocas invernales, cuando el suelo se encuentra saturado de humedad, es decir, en un suelo húmedo, la velocidad de infiltración inicial es baja (debido a un gradiente de succión pequeño), y se

logra más fácilmente una velocidad de infiltración constante. Es por esto que el contenido inicial de agua en el suelo y la conductividad hidráulica saturada del suelo son los principales factores que afectan el proceso de infiltración (Forsythe, 1975). Por ello se entiende que a menor saturación de agua, mayor será la capacidad de infiltración.

(l) Compactación

El principal problema correspondiente al grado de compactación en el área de estudio está influenciado debido al pastoreo de diversos tipos de ganados (como lo son el caprino y bovino principalmente). La tasa de infiltración varía en tiempo y espacio debido a las variantes en el clima, la vegetación e intensidad de ganado (Gifford y Hawkins, 1978), aunque pocos estudios han procurado explicar estas variaciones naturales (Blackburn *et al.*, 1982). La cobertura vegetal y el abono orgánico, sirve para proteger la superficie del suelo contra el impacto de las características del suelo y de la influencia de las gotas de lluvia (Bergkamp, 1998) o bien de las propiedades de la superficie del suelo tal como densidad y agregación (Osborn, 1954; Copeland, 1963; Blackburn, 1975). La reducción de las tasas de infiltración como resultado del pastoreo animal ha sido atribuido a: 1) pérdida de cubierta vegetal, 2) disminución de la cobertura de vegetal, 3) disminución de forraje en pie y cobertura, 4) Incremento del suelo desnudo y 5) Incremento de la densidad como resultado de pisoteo (Alderfer y Robinson, 1947; Knoll y Hopkins, 1959). Por otro lado se menciona que el tipo de vegetación es importante en la determinación de las tasas de infiltración (Blackburn, 1975).

(m) Tipos de Suelos

Un suelo con mayor contenido arcilloso (p.ej. un vertisol, rendzina o tchernozem) permitirá menor infiltración que uno con bajo contenido arcilloso (p.ej. regosol). Los siguientes tipos de suelo son localizados en la parte baja de la cuenca del Río Pablillo y presentan las siguientes características:

Feozem.- Se caracteriza por tener una capa superficial oscura, suave, rica en materia orgánica sin presentar capas de cal. Estos situados en laderas o pendientes, presentan como principal limitante la roca o alguna cementación muy fuerte en el suelo.

Fluvisol.- Literalmente, suelo de río. Se caracterizan por estar formado de materiales acarreados por agua. Son suelos muy poco desarrollados, generalmente estructura suelta. Se encuentran cercanos siempre a lechos de los ríos. Presentan capas alternadas de arena con piedras o gravas redondeadas.

Litosol.- Literalmente, suelo de piedra. Por lo general tienen una profundidad menor de 10 centímetros, limitada por la presencia de roca, tepetate o caliche endurecido.

Luvisol.- Literalmente, suelo con acumulación de arcilla. Se caracterizan por tener un enriquecimiento de arcilla en el subsuelo. Son frecuentemente rojos o amarillentos, sin embargo, debe tenerse en cuenta que son suelos con alta susceptibilidad a la erosión.

Regosol.- Capa de material suelto que cubre a la roca. En general son claros o pobres en materia orgánica, se parecen bastante a la roca de su origen.

Rendzina.- Connotativo de suelos someros que producen ruido con el arado por su pedregosidad. Se caracterizan por tener una capa superficial abundante en materia orgánica. Generalmente las rendzinas son suelos arcillosos y poco profundos por debajo de los 25 cm.

Vertisol.- Literalmente, suelo que se revuelve o que se voltea. Tienen un alto contenido de arcilla, la cual es expandible cuando adquieren humedad formando superficies de deslizamiento llamadas facetas. Su color más común es el negro o gris oscuro en la zona centro a oriente de México y de color café rojizo hacia el norte del país.

Xerosol.- Literalmente, suelo seco. Tienen por lo general una capa superficial de color claro por el bajo contenido de materia orgánica. Debajo de esta capa puede haber un subsuelo rico en arcillas (INEGI, 2004).

3.6.3. Factores bióticos

La vegetación con sus raíces facilita la infiltración y protege al terreno contra la compactación, pues un suelo desnudo está más expuesto al choque directo de las gotas de agua, lo que favorece la compactación así como el arrastre de las partículas finas, que pueden obstruir los poros del suelo y reducir la infiltración esto facilita que penetren hacia el interior y obstruyan los poros y grietas (Díaz *et al.*, 2005).

(a) Cobertura vegetal

Cuando se compara la superficie del suelo desnudo, con la superficie del suelo con cobertura vegetal, esta última tiende a aumentar la infiltración retardando el flujo superficial, dando más tiempo para la infiltración de agua. Las raíces de la planta también pueden aumentar la infiltración aumentando la conductividad hidráulica de la superficie del suelo. Debido a estos efectos, la infiltración puede variar ampliamente bajo los diferentes tipos de vegetación (Salgado, 1999). Las raíces de los árboles producen grietas en el suelo, favoreciendo la infiltración, además el follaje protege el suelo contra el impacto de las gotas de lluvia, reduciendo el efecto de compactación de estas y evitando por lo tanto, la erosión. También al disminuir la velocidad de escorrentía, por efecto de los tallos y troncos, la infiltración se incrementa y alcanza valores máximos en bosques vírgenes; cuando el bosque se tala inmediatamente disminuye la infiltración y aumenta la escorrentía superficial directa (Allison *et al.*, 1990; Jara y Valenzuela, 2002).

(b) Bioturbación en el suelo

En los suelos forestales (principalmente) se genera una capa superficial muy rica en materia orgánica, que alberga a su vez una abundante biomasa de especies de invertebrados y pequeños vertebrados (así como sus madrigueras). Gracias a su acción y la de otros procesos naturales, la descomposición progresiva de estos residuos orgánicos incrementa la porosidad del suelo, el número y tamaño de macroporos y por ende, la conductividad

hidráulica (o permeabilidad) del suelo. Al mismo tiempo, el alto contenido de materia orgánica aumenta la estabilidad de los agregados del suelo (pequeños terroncitos), previene su destrucción por erosión y restringe la consecuente formación de costras, susceptibles de sellar la superficie del suelo y disminuir su capacidad de absorber agua. Generalmente, los suelos de bosques, a diferencia de aquellos dedicados al uso agrícola o ganadero, permiten que el agua se infiltre en grandes cantidades, lo cual reduce el riesgo de erosión (Geissert, *et al.*, 2012).

3.6.4. Factores dependientes del fluido

Díaz *et al.*, (2005) hacen mención acerca de los factores dependientes del fluido agua que influyen en el proceso de infiltración, estos son la carga hidrostática, las partículas en suspensión o grado de turbidez del agua, los sólidos disueltos o contenido de sales y la temperatura del agua:

Con respecto a la carga hidrostática se considera que un espesor mayor de una columna o lámina de agua sobre el terreno favorece la infiltración. Por otra parte, un mayor contenido de material suspendido se reduce la porosidad (y por ende, la infiltración) debido a que se tapan los poros del suelo (pore clogging). En cuanto a los sólidos disueltos, el agua con mayor salinidad puede favorecer la formación de flóculos con los coloides del suelo, lo que reduce la intensidad de la infiltración. Mientras que la temperatura del agua afecta otras propiedades de esta, como la densidad, la viscosidad y la capilaridad; a menor temperatura, la viscosidad aumenta y se ve reducida la infiltración; la densidad no varía grandemente con los cambios en temperatura, así que se puede despreciar este efecto; la capilaridad no depende de la temperatura sino de la geometría de los poros principalmente; pero la viscosidad si cambia significativamente con la temperatura.

3.6.5. Factores antrópicos

Los factores antrópicos son aquellos que tienen que ver con la acción del hombre y su influencia en las características físicas del suelo. La clasificación de los factores antrópicos está basada en la principal actividad antrópica realizada dentro un terreno determinado, en la parte baja de la cuenca del río Pablillo se presentan 5 tipos de usos de suelo los cuales se describen a continuación:

(a) Uso Agrícola

De acuerdo al glosario del Sistema de Información Agropecuario (SIAGRO, 2006) se le asigna el término de uso de suelo agrícola, al conjunto de actividades relacionadas con el cultivo de la tierra, que buscan conseguir la satisfacción de algunas necesidades humanas como la alimentación y materias primas para la industria, por ello la agricultura moderna utiliza la producción, fuerza de trabajo asalariada y técnicas avanzadas: maquinaria y equipo (como tractor, rastra, arado, sembradora, cultivadora, etc.), así como también la aplicación de fertilizantes, semillas mejoradas (de sorgo, maíz, frijol y trigo), plaguicida, etc., su producción se destina al mercado y su fin principal es la obtención de una ganancia o beneficio.

(b) Uso Ganadero

El término ganadero hace referencia al conjunto de actividades que realiza el hombre para llevar a cabo la reproducción, cría, mejoramiento y explotación de los animales domésticos o ganado (caprinos y bovinos principalmente pero sin descartar a los porcinos y equinos) y para aprovechar los productos que de ellos se obtienen. El ganado se encuentra presente de forma extensiva en los potreros o agostaderos e intensiva en corrales y establos (SIAGRO, 2006). Así mismo las diversas actividades de la ganadería tienen cierto impacto sobre el ecosistema en el que se encuentra, uno de estos impactos suele darse en el proceso de la infiltración.

Gifford y Hawkins (1978) mencionaron que las tasas de infiltración varían en tiempo y espacio debido al clima, vegetación e intensidad del uso de ganado. La infiltración de agua en los suelos puede verse alterada si se disminuye o elimina la cobertura vegetal por la acción del pisoteo del ganado (Azooz y Arshad, 1996). La reducción de las tasas de infiltración como resultado del pastoreo animal ha sido atribuido a: 1).- Pérdida de la cubierta vegetal, 2).- Disminución de forraje en pie y cobertura, 3).- Incremento del suelo desnudo y 4).- Incremento de la densidad como resultado de pisoteo (Alderfer y Robinson, 1947; Knoll y Hopkins, 1959; Branson *et al.*, 1962; Copeland, 1963; Dee *et al.*, 1966; Smith, 1967).

(c) Uso Forestal

El uso de suelo forestal lo define la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) como el conjunto funcional de recursos forestales (fauna, flora, suelo y agua) y su interpretación entre sí y con el ambiente, en un espacio y tiempo determinados (SEMARNAT, 2006). El paisaje se encuentra dominado por árboles y consiste en comunidades biológicamente integradas de plantas, animales y microbios junto con los suelos y las condiciones del clima con los que interactúan (Kimmins, 2003). En las regiones de bosques el corte de árboles aumentó el potencial de la erosión del suelo y transporte de nutrientes, aunado a esto se reduce la tasa de infiltración y aumento del escurrimiento superficial (Moehring y Rawls, 1970; Douglas, 1975; Blackburn *et al.*, 1986).

Estas características se encuentran presentes en la porción sur-oeste de la parte baja de la cuenca del río Pablillo

(d) Uso Rural

En otro orden de ideas, el Consejo Nacional de Población (CONAPO) señala que el término rural se identifica con una población distribuida en pequeños asentamientos dispersos, con una baja relación entre el número de habitantes y la superficie que ocupan, así como predominio de actividades primarias, niveles bajos de bienestar y de condiciones de

vida (principalmente en países de menor desarrollo), considerando que las localidades rurales cuentan con un número menor a 5 mil habitantes (Villalvazo *et al.*, 2002). La compactación en áreas rurales o agrícolas se origina cuando el terreno es utilizado como camino de terracería o cuando los campos cultivados soportan el paso de tractores y maquinaria agrícola. Lo mismo sucede con los campos de pastoreo donde las pisadas del ganado compactan al suelo (Díaz *et al.*, 2005).

(e) Uso Urbano

El término urbano se relaciona con el concepto de ciudad, que se refiera a un espacio geográfico creado y transformado por el hombre con una alta concentración de población socialmente heterogénea, con radicación permanente y construcciones continuas y contiguas, donde se generan funciones de producción, transformación, distribución, consumo, gobierno y residencia, existiendo servicios, infraestructura y equipamiento destinado a satisfacer las necesidades sociales y a elevar las condiciones de vida de la población, considerando que las localidades urbanas cuentan con más de 15 mil habitantes (Villalvazo *et al.*, 2002). Posteriormente la urbanización trae consigo la modificación de las condiciones naturales del terreno, que en su mayoría no son favorables para el fenómeno de la infiltración.

3.7. Técnicas empleadas en la zona superficial (no saturada) para estimar la infiltración

Con el fin de evaluar la infiltración en la zona superficial del suelo, se han utilizado a lo largo del tiempo una serie de métodos que podemos clasificar de manera general en métodos directos e indirectos.

3.7.1. Métodos indirectos para la estimación de la infiltración

Los métodos indirectos están definidos por todos aquellos en los que el cálculo o estimación de la infiltración en la zona superficial del suelo se realiza a través de ecuaciones, en las cuales se consideran las variables tanto físicas como químicas del suelo; entre los métodos indirectos más utilizados podemos considerar los siguientes:

(a) Método de Green y Ampt (1911)

Es un método basado en la teoría del movimiento del agua en el suelo, en el cual, la ecuación de Green y Ampt (1911) es una simplificación de la ecuación de Richards (1953) con modelos adecuados que representen las propiedades hidráulicas de los suelos, que a su vez proviene de una combinación de la ecuación de Darcy (1856).

$$F = K_s \left[1 + \frac{M \cdot H_f}{f} \right] \quad (3.5)$$

donde;

F : Velocidad de infiltración (mm/h)

k_s : Conductividad hidráulica a saturación (mm/h)

M : Déficit de humedad inicial, correspondiente a la diferencia entre el máximo contenido de agua a saturación natural y la humedad inicial del suelo.

$$H_f = h_o + S$$

h_o : Tirante de agua acumulada sobre la superficie

S : Potencial del frente de humedad o carga de succión del frente mojado.

f : Lamina infiltrada (mm).

Las suposiciones básicas de la ecuación son (ecuación 3.5):

- Existe un frente de humedad muy bien definido para el cual la carga de presión del agua (hf) permanece constante en el tiempo y posición.

- En el frente de humedad, el perfil del suelo se encuentra uniformemente húmedo con una conductividad hidráulica constante (k_s).

Green y Ampt aplicaron la ley de Darcy entre la superficie del suelo y el frente de humedad, encontrando la siguiente ecuación (Chávarri, 2004):

(b) Método de Kostiakov (1932)

Es un método empírico en el cual, se aplica un modelo exponencial (Camacho *et al.*, 1997).

$$F = at^b, \text{ para } t \rightarrow \infty f = f_{\text{básica}} \quad (3.6)$$

donde;

F : Velocidad de infiltración

a y b : Coeficiente de ajuste

t : Tiempo transcurrido desde el inicio de la infiltración llamado también tiempo de oportunidad o tiempo de contacto del agua con el suelo.

$f_{\text{básica}}$: Tasa de infiltración correspondiente a la situación en que la variación entre dos valores consecutivos de f no sobrepasen el 10%.

f : Lámina total infiltrada en el tiempo " t " desde el inicio de la infiltración.

(c) Método de Horton (1940)

Es un método empírico en el que se realiza una suposición que el cambio en la capacidad de infiltración puede ser considerada proporcional a la diferencia entre la capacidad de infiltración actual y la capacidad de infiltración final, introduciendo un factor de proporcionalidad k (Chávarri, 2004).

$$f_p = f_c + (f_o - f_c)e^{-kt} \quad (3.7)$$

donde,

f_p : Capacidad de infiltración (mm/h)

k : Factor de proporcionalidad llamado también "parámetro de decrecimiento".

f_c : Capacidad de infiltración final.

f_o : Capacidad de infiltración inicial (Para $t = 0$).

t : Tiempo transcurrido desde el inicio de la infiltración (min).

(d) Método de Philip (1957)

El método de Philip (1957) es un modelo con una ecuación algebraica basadas en el razonamiento físico para la infiltración vertical bajo diferentes condiciones. En la ecuación solo dos parámetros de ajuste son suficientes para describir el comportamiento de la infiltración en relación con el tiempo (Rodríguez *et al.*, 2008):

$$I(t) = S_1 t^{1/2} + K_o t \quad (3.8)$$

donde,

S_1 - La sortividad ($\text{cm h}^{-0.5}$) describe la absorción de agua por el suelo como resultado del gradiente de potencial mátrico;

K_0 - La conductividad hidráulica saturada (cm h^{-1}), aunque diferentes autores solo la toman como parámetro de ajuste (Lima & Silans, 1999) o un factor (Machiwal *et al.*, 2006), definiéndola como un factor de transividad, que depende del contenido de agua inicial y del tipo de suelo.

Los modelos de Kostiakov y Philip son altamente eficientes para describir el comportamiento de la infiltración de agua en los suelos. Las diferencias observadas en las tasas de infiltración se atribuirían, más allá de la clasificación del suelo, a otros factores tales como el uso del suelo y la influencia de la carga animal (Landini *et al.*, 2007). Philip (1957) señaló que la ecuación de Kostiakov predecía bastante bien la infiltración si los tiempos no

son largos (Camacho *et al.*, 1997). Sin embargo, existen limitantes para el modelo de Philip, cuando el suelo presenta contenidos de agua altos (Rodríguez *et al.*, 2008).

El modelo de Philip comparado con otros modelos de infiltración (como lo son Kostiakov y Green y Ampt) muestra una mejor correlación para tiempos más largos (ej. 360 min, 460 min) por mucho tiempo el modelo de Philip pudo determinar el parámetro de infiltración mejor que los otros modelos (Mansour *et al.*, 2010).

Se concluye que, para que las **ecuaciones de Green y Ampt (1911)** sean aplicables, se requiere que el frente de humedad para cada sitio este bien definido y que se encuentre distribuido uniformemente en el perfil de suelo. En el **método de Kostiakov (1932)** requiere aplicar en varias ocasiones coeficientes de ajustes, en el transcurso del tiempo y es aplicable, siempre y cuando los valores de la tasa de infiltración no sobrepase un 10%. En el **método de Horton (1940)** considera un factor de proporcionalidad llamado también "parámetro de decrecimiento" en un tiempo determinado. En lo correspondiente al **método de Philip (1957)** es dependiente de los valores de un parámetro de ajuste o factor de transitividad (para cada caso en especial), que depende del contenido de agua inicial y del tipo de suelo en cada sitio de muestreo.

3.7.2. Métodos directos para la estimación de la infiltración

Los métodos directos, son aquellos en donde el cálculo de la infiltración se hace directamente en campo de forma cuantitativa, con ayuda de instrumentos que ayudan a controlar las variables físicas que pueden afectar al proceso de infiltración, de manera que la evaluación represente las condiciones naturales del suelo.

(a) Tensiómetro

El tensiómetro es un tubo lleno con agua, con una cápsula de porcelana en un extremo y con un manómetro indicador de la presión en el otro. La cápsula de porcelana especial es puesta en contacto con el suelo y equilibra la presión del agua dentro del tensiómetro con la succión del suelo, luego esta presión de equilibrio es medida por el manómetro; dicha cápsula de porcelana permite el paso de agua, pero impide el paso de partículas de suelo y de aire, pero es necesario el uso de otros aparatos para obtener resultados más precisos. Sin embargo en algunos suelos arenosos, las lecturas de los tensiómetros precisan hasta un 80% del agua en el suelo (Zúñiga, 2012).



Figura 3. 5.Fotografía de un tensiómetro para determinar la humedad en el suelo.

(b) Simuladores de lluvia

En ellos se aplica el agua en forma constante reproduciendo lo más fielmente el acontecer de la precipitación. Las gotas son del tamaño de las de la lluvia y tienen una energía de impacto similar, comparándose los efectos. Varían en tamaño, cantidad de agua necesaria y método de medición. El área de lluvia es variable entre 0,1 m² y 40 m². La diferencia entre precipitación y escorrentía representa la valoración del volumen infiltrado, el principal inconveniente es el impacto del agua sobre el suelo, por lo general, es en el mismo lugar y este efecto hace que exista compactación en esos puntos (Heras, 1970; Springall, 1976; Custodio, 1983).



Figura 3.6. Fotografía de un simulador de lluvia en una superficie agrícola con vegetación.

(c) Infiltrómetro de un anillo

Consiste en un tubo de cilíndrico de 0,20 a 0,25 cm de diámetro y un alto de 0,60 m, que se hincan en el suelo, midiéndose el descenso del agua, con el principal inconveniente que el agua infiltrada por el círculo del fondo, en las zonas del suelo a los lados del aparato participan también en la infiltración, dando medidas superiores a la realidad (Heras, 1970; Springall, 1976; Custodio, 1983).



Figura 3.7. Infiltrómetro de un anillo hincado en el suelo, midiéndose el descenso del agua.

(d) Cilindro excavado en el suelo, Método de Porchet

Se excava en el suelo un hoyo cilíndrico de radio R y se llena de agua hasta una altura " h ". La superficie a través de la cual se infiltra el agua es:

$$S = 3.14 * R * (2h + R) \quad (3.9)$$

Para un tiempo, dt , suficientemente pequeño para que pueda suponerse que la capacidad de infiltración, f , es constante se verificará la igualdad de:

$$3.14 * R(2h + R) * f = -3.14 * R^2 * dh / dt \quad (3.10)$$

Simplificando y separando variables obtenemos:

$$f * dt = -R * dh / (2h + R) \quad (3.11)$$

Si realizamos la integración matemática obtenemos:

$$f = R / (2 * (t_2 - t_1)) * \ln((2h_1 + R) / (2h_2 + R)) \quad (3.12)$$

Por lo que para determinar la capacidad de infiltración en función del tiempo, nos bastará medir pares de valores (h_1, t_1) y (h_2, t_2) , de forma que t_1 y t_2 no difieran demasiado y reemplazarlos en la fórmula anterior, los principales inconvenientes es que se desconoce la infiltración de agua en la superficie del suelo, así como también la aplicación de este método genera infiltración lateral en las paredes del hoyo (por lo que tiene un margen de error sobre las mediciones (Arce, 2014).

(e) Infiltrómetro de doble anillo de tipo inundador

Se utiliza para determinar la conductividad hidráulica en el suelo, el cual el anillo exterior evita la infiltración horizontal del agua por debajo del cilindro interior, para que el anillo interior proporcione solo el flujo vertical (Ibañez *et al.*, 2009).



Figura 3.8. Fotografía del infiltrómetro de doble anillo terminado con su tapa, la cual sirve para golpearlo en la parte central para que pueda hincarse en el suelo, así como con estructuras (agarraderas) para tomarlo con mayor facilidad para su manejo.



Figura 3.9. Fotografía de un hoyo cilíndrico en el suelo lleno de agua (método de Porchet), midiendo el descenso de la misma para determinar la infiltración.

3.8. Metodología para la evaluación de las características físicas de los suelos

A continuación se presenta un análisis de los métodos utilizados para la evaluación de las características o propiedades físicas de los suelos, tales como la granulometría, textura contenido de humedad y densidad.

3.8.1. Técnicas para determinar la granulometría de los suelos

Uno de los conflictos para la selección del procedimiento para realizar el análisis mecánico de los suelos, es la selección de los pre-tratamientos y los agentes dispersantes, considerando su efecto en los agentes cementantes naturales. Las principales técnicas que se utilizan para determinar la granulometría en los suelos son las siguientes:

(a) Los métodos de la pipeta e hidrómetro

Los métodos de la pipeta e hidrómetro (los cual utilizan pre-tratamientos y agentes químicos dispersores) son considerados como procedimientos estándar principalmente para la determinación de la distribución de tamaño de partículas de la fracción fina del suelo (Donald y Lobo, 2011).



Figura 3.10. Fotografía de Pipeta de Andreasen (10 cc).



Figura 3.11. Fotografía de Hidrómetro.

(b) Método granulométrico de cribas.

En ese Método el material se mezcla para homogenizar el suelo, se limpia de cualquier materia orgánica y fragmentos de rocas que pueda contener, se pulveriza con un martillo de goma y se pone a secar extendiendo el material y dejándolo a temperatura ambiente por tiempo prolongado de varios días a la intemperie. Se cuartea la muestra, después, se toman pequeñas cantidades de un extremo, del extremo opuesto, hasta completar la cantidad necesaria para realizar la muestra. El material se pesa en la balanza electrónica (con exactitud de 0.1 g) y se registra como el peso seco inicial de 1.5kg de suelo. Las cribas de distintos diámetros se apilan una sobre otra en un orden descendente según los distintos tamaños, quedando arriba la criba con mayor diámetro (Tamiz No. 10 equivalente a 2mm) y abajo la de menor diámetro (Tamiz No. 635 equivalente a 0.025mm). El material se deposita sobre las cribas, estas se tapan y se colocan en la máquina vibradora, la cual funcionará por aproximadamente 15 minutos. Posteriormente se pesan las cantidades de material retenido en cada una de las mallas. Se registra la información. Al sumar el total de pesos registrados la cantidad debe ser casi igual al peso seco inicial (se tolerará una pérdida de no más del 3% de la muestra).



Figura 3. 12. Fotografía de cribas utilizadas para determinar la granulometría en muestras de suelos.

3.8.2. Técnicas para determinar la textura de los suelos

La determinación de la textura al tacto engloba todas las propiedades que las partículas confieren al suelo (Donald y Lobo, 2011). Esta propiedad ayuda a determinar la facilidad de abastecimiento de los nutrientes, agua y aire. Pero en esta técnica se hacen inferencias en el triángulo textural en el cual se identifican los rangos para cada granulometría según la clase textural encontrada.

Torres (2013) menciona que una vez proporcionando una cierta cantidad de agua a una pequeña muestra de suelo y amasándolo para formar filamentos se pueden establecerse los siguientes 3 grupos generales: **a)- Suelos arcillosos:** Se pueden hacer los filamentos de 3 mm y de 1 mm. No se rompe ni resquebraja el anillo, **b)- Suelos limosos:** Se pueden hacer los filamentos de 3 mm y de 1 mm. Los de 3 mm se rompen o resquebrajan al intentar formar el anillo (contienen del 20 al 35 % de limo más arcilla) y **c)- Suelos arenosos:** No se pueden hacer los filamentos de 3 mm (contienen menos de 20 % de limo más arcilla).



a).- Textura arcillosa



b).- Textura limosa



c).- Textura arenosa

Figura 3. 13. Fotografía de los tipos de texturas por el método del tacto de manera general.

3.8.3. Determinación del contenido de humedad del suelo

Para la medición de la humedad del suelo en un cierto momento existen varios métodos considerados como indirectos y directos. En los métodos indirectos no se requiere retirar el agua del suelo, sino que se miden las propiedades que se correlacionan con el agua, en estos métodos se recurre a curvas de calibración (por ejemplo, la conductividad eléctrica del suelo), los cuales son:

(a) El método de la conductividad eléctrica

En este se usan unos electrodos que se encuentran incrustados en unos bloques hechos de material poroso (ej. el yeso), estos electrodos están conectados a un conductivímetro y a una batería en donde se mide la conductividad de dicho suelo a ese contenido de agua. Los fabricantes de estos instrumentos proporcionan una calibración para transformar la conductividad eléctrica a porcentaje de humedad.



Figura 3.14. Fotografía de un medidor de la conductividad eléctrica o de resistencia.

(c) El método de la dispersión de neutrones

Consta de una sonda que contiene una fuente de neutrones acelerados y un detector de neutrones lentos, la cual se introduce en el suelo a través de un tubo de acceso y un medidor que monitorea el flujo de neutrones lentos. La efectividad de los núcleos del suelo para moderar neutrones acelerados varía grandemente.

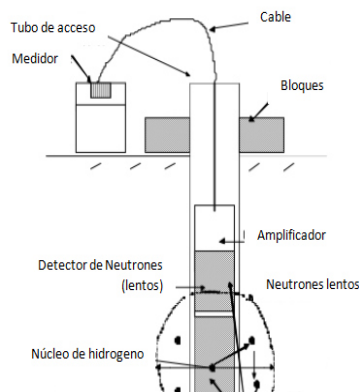


Figura 3.15. Esquema de funcionamiento de una sonda de neutrones de profundidad para determinar la humedad que tiene un suelo (modificado de Florentino, 2011).

(c) El método de absorción de rayos gamma

Consta de una fuente radioactiva del elemento químico Cesio y un detector, que consiste de un contador conectado a un amplificador. Este método es empleado principalmente en el laboratorio debido a que las dimensiones, densidad y temperatura ambiente requieren controlarse (González, 2011).



Figura 3.16. Explorador de rayos gama.

(d) Reflectometría de Dominio del Tiempo (TDR)

Se basa en la inusualmente alta constante dieléctrica del agua. Consiste de un par de varillas metálicas conectadas a un receptor de señal las cuales se insertan en el suelo, sin embargo se tendrían que conocer la constante dieléctrica de los sólidos en el suelo, la cantidad de aire, así como los valores para cada variable que se requieren en cada sitio de muestreo.



Figura 3.17. Diferentes tipos de TDR (Muñoz, 2004).

En los métodos directos se requiere realizar el secado del suelo, entre ellos podemos mencionar los siguientes:

(e) El método del secado con alcohol

En este se requiere lleva una balanza al campo, se toman las muestras, se pesan, se impregnan con alcohol, posteriormente se enciende para que se evapore la humedad que contiene y finalmente se vuelven a pesar. Con este método la combustión de la materia orgánica es más rápida por lo que éste puede ser un inconveniente en suelos con un alto contenido de materia orgánica.



Figura 3. 18. Fotografía secado el suelo con alcohol encendido.

(f) El método gravimétrico

Se utiliza para determinar el contenido de humedad en el suelo ya que tiene una mayor exactitud a los antes mencionados (ver figura 3.19).

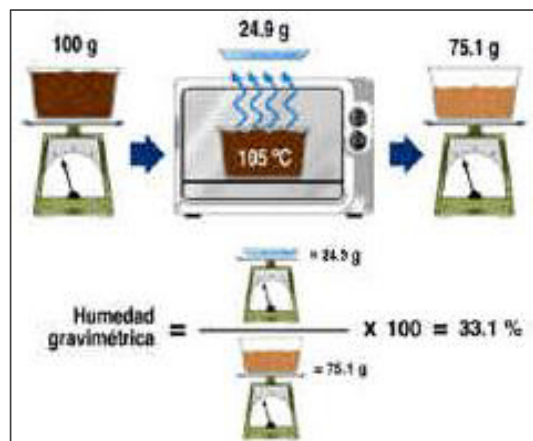


Figura 3. 19. Procedimiento para determinar el contenido de humedad en una muestra de suelo.

Para la aplicación de este método se toma una pequeña muestra de suelo (150 a 200 gr) la cual se deposita en un pequeño frasco (capsula de aluminio) que se cierra herméticamente (con una porción de película plástica auto adherible alrededor) para evitar la pérdida de humedad; las muestras una vez que han sido debidamente etiquetadas con los datos del sitio de muestreo se llevan al laboratorio donde se pesan y posteriormente se introducen las capsulas destapadas en una estufa eléctrica que se encuentra a una temperatura de 105 °C constante donde permanecerán por 24 horas para su posterior pesaje.

El contenido de humedad (W) de cada muestra se calcula con la siguiente fórmula (González, 2011):

$$W (\%) = \frac{\text{Peso de suelo húmedo} - \text{Peso de suelo}}{\text{Peso de suelo seco}} \quad (3.13)$$

$$W (\%) = \frac{\text{Peso del agua}}{\text{Peso de suelo seco}} \times 100 \quad (3.14)$$

3.8.4. Determinación de la densidad del suelo

El grado de compactación se determina por medio de pruebas de densidad efectuadas en el campo sobre las muestras. Para la determinación de las densidades se aplican los siguientes métodos más utilizados (Reynolds, 2012):

(a) El método del Cono de Arena (ASTM D 1556)

Es un método muy utilizado donde el aparato corresponde a un recipiente de forma cilíndrica cuya parte inferior termina en un embudo donde se encuentra una válvula que permite controlar el paso de la arena de calibración que contiene el recipiente. Sin embargo, se limita a suelos saturados y muy blandos o muy sueltos, ni es ejecutable para suelos orgánicos (Guzmán, 2013).

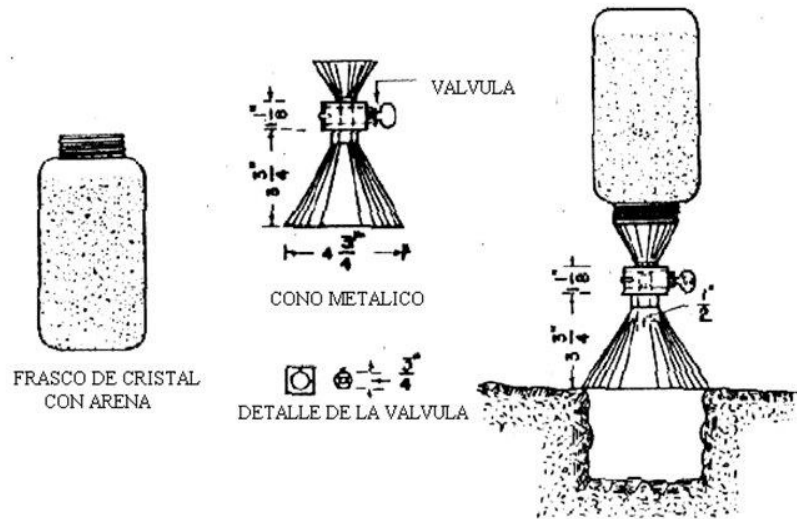


Figura 3. 20. Esquema de un ensayo del cono de arena (In Situ).

(b) Método del Globo de Hule (ASTM D-2167)

Consiste en un recipiente de vidrio cilíndrico, graduado donde en el fondo se coloca un globo de látex estabilizado por medio de un plato metálico, el principal error es en la precisión con la que se realice el agujero en el suelo (debido a que, por lo general, existen fragmentos de rocas que se deben de remover).

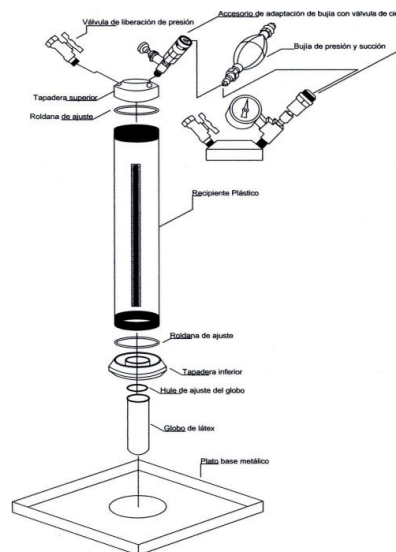


Figura 3. 21. Diagrama de aparato de Globo de Hule (Guzmán, 2013).

(c) El método del Densímetro Nuclear (ASTM D 2922 y D 3017)

Se trabaja con elementos radiactivos, está basado en la interacción de los rayos gamma provenientes de una fuente radiactiva y los electrones de las órbitas exteriores de los átomos del suelo. Sin embargo, el resultado con este método puede verse afectado debido a la heterogeneidad del suelo, a un grado menor de la densidad del material, así como también a rocas muy grandes o espacios vacíos que se encuentren en el paso de la fuente-detector, por ello pueden causar resultados de densidades erróneas (Guzmán, 2013).



Figura 3. 22. Diagrama de Densímetro Nuclear.

(d) El método mediante bloques de yeso

Se utiliza en suelos cohesivos en estado natural, que no se deforman ni se desmoronan por ejemplo no es aplicable a suelos muy arenosos donde no hay cohesión (Guzmán, 2013).



Figura 3. 23. Fotografía de medidor de humedad mediante bloques (Guzmán, 2013).

3.9. Integración y análisis de la información de campo y laboratorio

A continuación se presenta un análisis de la metodología para la obtención de datos de campo y laboratorio, además del análisis estadístico de estos.

3.9.1. Análisis para el tipo de muestreo

Para la obtención de datos representativos de un fenómeno evaluado, existen diversos tipos de muestreos como lo son, el *muestreo de conveniencias* (aplicable principalmente para unidades más fácilmente accesibles), *de juicios* (depende de la prospectiva de cada persona, así como su orientación profesional), *aleatoria simple* (todo el subconjunto escogido tiene la misma oportunidad igual de ser seleccionada), *aleatoria sistemática* (dirigida principalmente al seleccionar uno de los parámetros a evaluar), *aleatoria estratificada* (es cuando la población a ser muestreada contiene dos o más estratos claramente distinguibles), *aleatoria agrupada* (con formación de grupos en forma natural, con base a la accesibilidad física), estos tipos de muestreo pueden ocasionar inferencias invalidas, por esta razón se utilizó el *muestreo aleatorio*, debido a que es el más importante ya que evita el problema de la falta de representatividad (Hurtado, 2012).

3.9.2. Selección del método estadístico

De acuerdo con las variables analizadas se descartó la aplicación de estadística descriptiva debido a que está trabaja con toda la información (o censo) del área de estudio, considerando esto, se aplicó estadística inferencial debido a que esta analiza las muestras tomadas, utilizando parámetros así como variables cuantitativas discretas y continuas (según sea el caso), descartando las variables cualitativas (Hurtado, 2012).

3.9.3. Método de Regresión

Estos métodos muestran las relaciones determinantes y cuantificables entre dos o más variables, para establecer ecuaciones predictivas cuando se conjugan las diferentes variables, para que se lleve a cabo esto se aplicaron análisis de regresión lineal (el cual busca la ecuación de una línea recta que describe la relación entre las dos variables), así como el diagrama de dispersión (que es la representación en un plano cartesiano de las parejas de puntos de los datos de las variables independiente y dependiente) para ello se requiere la aplicación del método de ajuste manual (el cual tiene un juicio subjetivo) ó el método utilizado que fue el de ajuste por mínimos cuadrados, el cual tiene un juicio más objetivo (Hurtado, 2012).

El coeficiente de determinación es el término que mide el poder explicativo del modelo de regresión, es decir, la parte de la variación de Y explicada por la variación de X. Se designa como r^2 . El valor de este coeficiente varía entre 0 y 1, ya que es imposible explicar más del 100%; a mayor valor de r^2 mayor poder explicativo tendrá nuestro modelo (Hurtado, 2012).

3.9.4. Pruebas de Normalidad

Para conocer el tipo de distribución de los datos de una muestra, se pueden usar las pruebas de Kolmogorov Smirnov o de Shapiro-Wilks. Ambas miden si existen diferencias significativas en los datos con respecto a datos hipotéticos con una distribución normal, la prueba de Kologrov se utiliza para muestras de más de 50 datos mientras que la prueba de Shapiro-Wilks es menos conocida, pero es la que se recomienda para contrastar el ajuste de nuestros datos cuando la muestra es pequeñas ($n < 50$) (Molinero, 2003).

3.9.5. Coeficiente de correlación

La correlación mide la fuerza o grado de unión entre las variables dependiente y la independiente. Este coeficiente de correlación y el coeficiente de determinación sirven para determinar la bondad de ajuste, es decir, si el modelo encontrado es adecuado para el análisis de regresión lineal. El coeficiente de correlación es igual a la raíz cuadrada del coeficiente de determinación y se designa con la letra r . Cabe mencionar que hay mucha discrepancia para decir cuáles son intervalos que determinan si una correlación es buena, lo que es aceptado que en la medida que nos acercamos a -1 a $+1$ la correlación es buena y a medida que nos acercamos a cero la correlación tiende a ser mala. El coeficiente de correlación de Pearson requiere que la distribución de las variables sea semejantes a la de la curva normal (es decir, que tengan sesgo y curtosis parecidos a los de dicha distribución). Sin embargo, cuando las variables, siendo cuantitativas continuas, no tienen una distribución semejante a la de la curva normal, o cuando una o ambas son de tipo discreto, el coeficiente idóneo para evaluar la intensidad de la asociación es el descrito por Spearman, que se simboliza con r_s , (Reynaga, 2011), el cual mide el grado de asociación que sigue una tendencia siempre creciente o siempre decreciente, en cambio se puede calcular para relaciones exponenciales o logarítmicas entre las variables (Acuña, 2009).

3.9.6. Correlación Canónica

Determina la relación multivalente entre los factores evaluados y el resultado son la generación de vectores aleatorios generalizando las correlaciones correspondientes. (Badii *et al.*, 2007; Cuadras, 2014).

3.9.7. Análisis de Factores

Para el análisis estadístico de muestras con distribución libre o no-paramétrica, se utilizan métodos tales como, el análisis de Kolmogorov-Smirnov para una muestra; los análisis de Signos y de Wilcoxon para dos muestras relacionadas; los análisis de Frideman y Kendall para dos o más muestras relacionadas; los análisis de Mediana, Mann-Whitney, Kolmogorov-Smirnov, Wald-Wolfowitz y Moses que corresponden a la evaluación de dos muestras independientes; y el análisis de Kruskal-Wallis que corresponde al análisis de dos o más muestras independientes. (Lejarza y Lejarza, 2014).

3.9.8. Análisis de Clúster

Tiene por objeto agrupar elementos en grupos homogéneos en función de las similitudes entre ellos. Detecta grupos internamente homogéneos (y heterogéneos entre sí).

Este tipo de análisis es aplicable solo en tres situaciones:

a).- *Partición de los datos*: En este se dispone de observaciones que pudieran ser heterogéneas y puedan dividirse en un n° prefijado de grupos, de tal manera que todo elemento quede clasificado y pertenezca a un solo grupo y los grupos sean internamente homogéneos.

b).- *Clasificación de variables*: Es aplicable con muchas variables para hacer una división en grupos y posteriormente reducir la dimensión.

c).- *Construcciones de jerarquías*: Son estructuras formadas por los elementos en un conjunto de forma jerárquica por su similitud \Rightarrow ordenar en niveles (se aplican con $n < 200$ datos) (Ayuga, 2008).

(a) Estandarización de los Datos

Previamente a la realización del análisis de clúster puede ser necesaria la transformación o estandarización de los datos con el fin de eliminar los prejuicios de las diferencias en las escalas de los distintos atributos (variables), de modo que no afecten en el resultado del análisis, para ello existen diversas maneras para estandarizar la información (Lucendo, 2007).

(b) Medidas de proximidad y de distancia

Una vez establecidas las variables y los objetivos a clasificar el siguiente paso consiste en establecer una medida de proximidad o de distancia entre ellos que clasifique el grado de similitud entre cada par de objetos (Prieto, 2006).

(c) Medidas de Semejanza

Es una medida de correspondencia, o del parecido entre individuos que van a ser agrupados. Aquí, las características que definen la semejanza, se especifican en primer lugar, y a continuación, se combinan las características en una medida de semejanza calculada para los pares de individuos. El procedimiento del análisis de conglomerados procede a continuación a agrupar individuos similares en el mismo conglomerado.

La matriz de los datos se pueden estudiar a partir de dos puntos de vista fundamentales: si se desea evaluar las relaciones entre los objetos o de las relaciones entre los descriptores o variables. El aspecto importante es que ambos modos de análisis están basados en diferentes medidas de asociación. La medida de la dependencia entre los descriptores se realiza utilizando el coeficiente de correlación r de Pearson por lo que el estudio de la matriz de base con tales coeficientes se llama análisis R . por el contrario, el estudio de la matriz para analizar las relaciones entre objetos es llamado el análisis Q .

Con los coeficientes de dependencia, se usa el modo R, al cero le corresponde la no asociación. En estudios del modo Q, los coeficientes de semejanza o similitud entre objetos será diferenciado de los coeficientes de distancia (o desemejanza). Las similaridades o semejanzas son máximas cuando los dos objetos son idénticos y mínimas cuando dos objetos son totalmente diferentes; mientras que las distancias siguen el sentido opuesto.

La discusión de los coeficientes de asociación se centra solamente en los dos modos básicos, es decir las medidas Q (entre objetos) y las medidas R (entre descriptores), (Prieto, 2006).

(d) Medidas de Distancia

Uno de los aspectos clave del análisis de conglomerados es la elección de la medida que se desea utilizar para cuantificar la distancia entre los elementos. Esta opción incluye medidas de similitud o disimilitud para datos cuantitativos obtenidos con una escala de medida de intervalo o razón.

Las medidas de distancia utilizadas para el agrupamiento pueden ser también muy diversas; entre ellas se encuentran (Prieto, 2006; Prado, 2009):

Distancia euclidiana.- Medida de disimilitud utilizada por defecto para datos de intervalo. Raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores de las variables.

$$EUCLID(X, Y) = \sqrt{\sum_i (X_i - Y_i)^2} \quad (3.15)$$

Distancia euclidiana al cuadrado.- Medida de disimilaridad. Suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores de las variables.

$$SEUCLID(X,Y) = \sum_i (X,Y)^2 \quad (3.16)$$

Distancia Coseno.- Medida de similitud. Medida estrechamente relacionada con el coeficiente de correlación de Pearson. Es el coseno del ángulo formado por dos vectores de puntuaciones. Tiene un máximo de 1 y un mínimo de -1.

$$COSINE(X,Y) = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i}{\sqrt{(\sum_i X_i^2)(\sum_i Y_i^2)}} \quad (3.17)$$

Distancia de Correlación de Pearson.- Medida de similitud angular con las variables en escala tipificada. Se trata de una medida típica de relación lineal entre variables. Toma valores entre -1 y 1.

$$CORRELATION(X,Y) = \frac{\sum_i z_{xi} z_{yi}}{n-1} \quad (3.18)$$

donde;

n = es el tamaño de la muestra y z_x y z_y son las puntuaciones tipificadas del sujeto i en las variables X e Y, que son las variables entre las que se calcula la distancia.

Distancia de Chebychev.- Medida de disimilaridad. Diferencia más grande en valor absoluto entre los valores de dos variables.

$$CHEBYCHEV(X,Y) = \text{máx} |X_i - Y_i| \quad (3.19)$$

Distancia de Bloques.- Medida de disimilaridad. También llamada distancia absoluta, distancia de ciudad, de Manhattan y del taxista. Es la suma de los valores absolutos de las diferencias entre los valores de dos variables.

$$BLOCK(X, Y) = \sum_i |X_i - Y_i| \quad (3.20)$$

Distancia de Minkowski.- Medida de disimilaridad basada en la distancia euclidiana. Raíz de orden p de la suma de las potencias de orden p de los valores absolutos de las diferencias entre los valores de dos variables.

$$MINKOWSKI(X, Y) = \left(\sum_i |X_i - Y_i|^p \right)^{\frac{1}{p}} \quad (3.21)$$

donde;

p = es cualquier número entero positivo.

Distancia Personalizada.- Medida de disimilaridad basada en la distancia euclidiana. Raíz de orden r de la suma de las potencias de orden p de los valores absolutos de las diferencias entre los valores de dos variables.

$$POWER(X, Y) = \left(\sum_i |X_i - Y_i|^p \right)^{\frac{1}{r}} \quad (3.22)$$

(e) Métodos de Clúster

A continuación se presenta una lista de los métodos que permiten construir un árbol de clasificación o dendrograma:

Métodos Jerárquicos.- En los métodos jerárquicos los individuos no se particionan en clusters de una sola vez, sino que se van haciendo particiones sucesivas a " distintos niveles de agregación o agrupamiento". Fundamentalmente, los métodos jerárquicos suelen subdividirse en métodos aglomerativos (ascendentes), que van sucesivamente fusionando grupos en cada paso; y métodos divisivos (descendentes), que van desglosando en grupos cada vez más pequeños el conjunto total de datos (Fuente, 2011; Ayuga, 2008).

Método de la distancia mínima.- En este método se procede de acuerdo con el algoritmo general considerando la distancia entre clusters como la distancia mínima entre los individuos más próximos. Este método es espacio-contractivo, esto es, tiende a aproximar los individuos más de lo que indicarían sus disimilaridades o distancias iniciales. El método del mínimo ha sido reivindicado "matemáticamente preferible" por sus propiedades por Jardine y Sibson (1968). Sin embargo, ha sido muy criticado por ser muy sensible en aquellos casos en los que existen individuos perturbadores entre clusters bien diferenciados individuos intermedios (casos con "disturbio") (Jardine and Sibson, 1968).

Método de la distancia máxima (furthest neighbour o complete linkage).- Este método, debido a Johnson, utiliza el algoritmo general para la obtención de la clasificación jerárquica ascendente, pero considerando la distancia entre clusters con la distancia entre los individuos más alejados. Por modificar la métrica en sentido inverso que el método anterior, este método es espacio-dilatante, en el sentido en que tiende a separar a los individuos en mayor medida que la indicada por sus disimilaridades iniciales. El método de la distancia máxima se encuentra, como el anterior, en franca decadencia, ya que presenta los inconvenientes de alargar mucho el proceso y dar como resultado agrupaciones encadenadas (Fuente, 2011; Ayuga, 2008).

Método de la media (u.p.g.m.a.).- Los dos métodos anteriores, a pesar de poseer buenas propiedades teóricas tienen el inconveniente de distorsionar las medidas iniciales de disimilaridad, constringiendo o dilatando, respectivamente, la métrica. Una solución al problema fue el método ideado por Sokal and Michener (1958), conocido como Group Average; (Sokal and Michener, 1958).

Sokal y Michener (1958) propusieron utilizar como distancia entre un grupo I y un individuo j la media de las distancias entre los individuos del grupo I y el individuo j:

$$D(I, j) = \frac{1}{N_I} \sum_{i \in I} D(i, j) \quad (3.23)$$

Posteriormente, Lance y Williams (1967) extendieron la definición a la distancia entre dos grupos como la media de todas las distancias entre todos los pares de individuos de los

dos grupos. Este método es espacio-conservativo, esto es, no hace variar considerablemente la métrica inicial, y resulta ser uno de los más utilizados, resolviendo de forma más aceptable la presencia de disturbio.

Método del centroide.- Fue propuesto originalmente, también, por Sokal y Michener (1958) y utiliza como distancia entre grupos la distancia entre los centroides de cada grupo. Este método es, también, espacio-conservativo, pero presenta el inconveniente de dejarse influir excesivamente por los grupos de mayor tamaño. Esto hace que sea menos utilizado que el anterior (Sokal and Michener, 1958).

Método de la mediana.- La mayor desventaja del método del centroide es que si se fusionan dos grupos de diferente tamaño, el centroide del nuevo grupo queda más cerca del grupo de mayor tamaño y más alejado del de menor tamaño en proporción a sus diferencias de tamaño. Esto trae como consecuencia que durante el proceso aglomerativo de fusión se van perdiendo paulatinamente las propiedades de los grupos pequeños. Para evitar esto, puede suponerse, con independencia del tamaño que tengan los grupos en realidad, que los grupos son de igual tamaño. Llevando a cabo esta estrategia, la distancia entre un individuo o grupo K de centroide k y el grupo formado por la fusión de los grupos I y J de centroides i y j viene dada por la mediana del triángulo i, j, k . Razón por la cual Gower propuso el nombre de método (distancia) de la mediana. Este método es, como el del centroide, espacio-conservativo, aunque también como él no resulta ser invariante ante transformaciones monótonas de la distancia empleada, cosa que sí ocurría con los tres primeros métodos (Fuente, 2011; Ayuga, 2008).

Método de Ward o de Varianzas mínimas.- Ward (1963) propuso que la pérdida de información que se produce al integrar los distintos individuos en clusters puede medirse a través de la suma total de los cuadrados de las desviaciones entre cada punto (individuo) y la media del cluster en el que se integra. Para que el proceso de clusterización resulte óptimo, en el sentido de que los grupos formados no distorsionen los datos originales, proponía la siguiente estrategia: En cada paso del análisis, considerar la posibilidad de la unión de cada par de grupos y optar por la fusión de aquellos dos grupos que menos incrementen la suma

de los cuadrados de las desviaciones al unirse. El método de Ward es uno de los más utilizados en la práctica; posee casi todas las ventajas del método de la media y suele ser más discriminativo en la determinación de los niveles de agrupación. Una investigación llevada a cabo por Kuiper y Fisher (1975) probaron que este método era capaz de acertar mejor con la clasificación óptima que otros métodos como lo son el mínimo, máximo, media y centroide.

3.9.9. Software estadístico

Existen en el mercado distintos paquetes de software estadístico como los son: Excel (programa de acceso gratuito para la elaboración de la base de datos, cálculos, análisis estadísticos, etc.), *SPSS* (programa de acceso gratuito para fines de investigación y sociología), *Statgraphics* (usado para la calidad y productividad en diversas áreas), *Minitab* (para el mejoramiento de la calidad en organizaciones manufactureras y de servicio), *Statistica* (aplicación en investigación científica, en minería de datos), *Matlab* (programa matemático y estadístico de análisis descriptivo), *SAS* (aplicable en estadística analítica y estudios ecológicos), *Epi Info* (utilizado por epidemiológicos), *Stata* (para análisis de encuestas bietápicas), *Canoco* (programa de acceso gratuito para análisis de especies, variables ambientales o lugares), así como también el software estadístico MVSP (programa de acceso gratuito usado en las áreas científicas, para realizar análisis numéricos multivariantes, correspondencias, etc.), que cubren todas las necesidades de cualquier usuario de técnicas estadísticas, básicas o avanzadas. (Sáez, 2012; Arriaza *et al.*, 2008; Frerichs *et al.*, 2008; Belén *et al.*, 2010; López y Fachelli, 2013; Statgraphics, 2006; Mendoza, 2012; Hernández y Cuevas, 2013; Salas, 2008; Luis, 2008).

CAPÍTULO IV METODOLOGÍA

4.1. Determinación del tipo de suelo

En el área de estudio se encuentran predominando los suelos regosoles, luvisoles, predominando los vertisoles, aunque también se presentan feozems, fluvisol, xerosoles, litosoles y rendzinas (INEGI, 1981). Estos tipos de suelos fueron analizados de acuerdo a la Guía para la Interpretación de Cartografía Edafológica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2004), la cual muestra una clasificación de cada grupo de suelo, así como sus características y de una manera visual, debido a que la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB), La Organización para la Agricultura y la Alimentación de las Naciones Unidas (FAO), la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), La Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo (ISSS) y el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA); (IUSS, 2006 y Grupo de Trabajo WRB,2006), consideran una clasificación de suelo de manera más general y sin mostrar información visual a cerca de cada grupo y las unidades de suelo, por esa razón se tomó la clasificación del INEGI, dando como resultado los diversos tipos de suelos presentes en el área de estudio.

4.2. Determinación del uso de suelo

Se determinó el conjunto de actividades generales que se realizan en el área de estudio, las cuales son las principales que se requieren para satisfacción algunas de las necesidades humanas como la alimentación, materias primas y la industria, dividiéndolas en 5 tipos de usos de suelo como lo son: Agrícola, Ganadero, Forestal, Rural y Urbano.

4.3. Técnica empleada para estimar la infiltración en la zona superficial (no saturada)

El infiltrómetro de doble anillo tipo inundador es un método directo, el cual consiste en un instrumento que se utilizó para determinar la conductividad hidráulica en el suelo, donde el flujo en el tubo interior se debe únicamente a la absorción del suelo, siendo éste el objetivo de esta técnica. El anillo exterior también tiene la función de evitar la infiltración horizontal del agua por debajo del cilindro interior, de tal forma que las medidas se correspondan con seguridad al flujo vertical (Ibañez *et al.*, 2009).

El infiltrómetro de doble anillo consta de dos anillos de metal de hierro concéntricos, las medidas del anillo exterior son de 53 cm de diámetro por 25 cm de altura y el anillo interior tiene 28 cm de diámetro por 25 cm de altura (Ibañez *et al.*, 2009), los anillos en su parte inferior se encuentran biselados para que puedan penetrar con mayor facilidad en el suelo estos anillos están unidos por unas tiras de metal (con soldadura eléctrica) para mantener fijos y centrados los anillos al momento de hincarlos en el suelo y así mismo para que no tengan movimiento alguno y esto no influyan negativamente al momento de la toma de los datos.

Posteriormente se requirió la elaboración de una tapa metálica reforzada para que se coloque en la parte superior de los cilindros, esta estructura sirve para golpear en la parte central (con un mazo metálico grande) para que se distribuya la energía en todas las partes por igual de los cilindros con la finalidad de hincarlos en el suelo (a una profundidad de 5cm), los dos en el mismo momento.

En una superficie de uso agrícola se realizó un corte vertical en el suelo en un experimento de una prueba de infiltración, para analizar, visualizar la forma y distribución del agua en el frente de humedad.

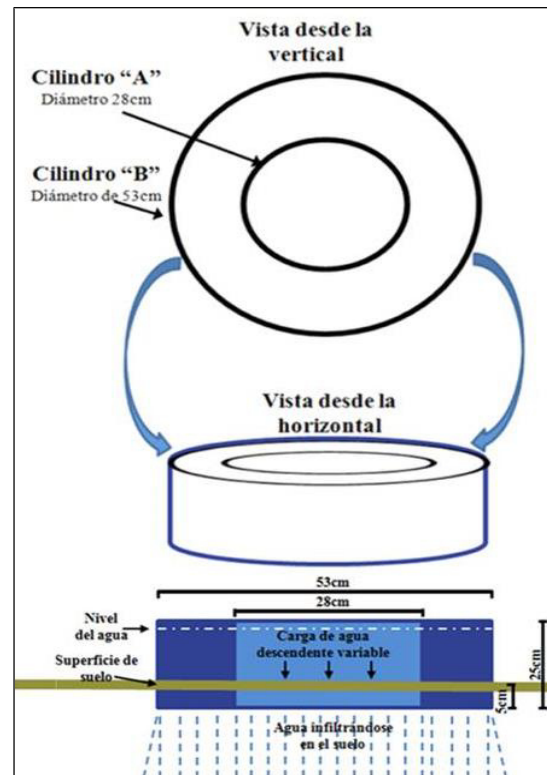


Figura 4. 1. Esquema representativo del infiltrómetro de doble anillo (de cilindros concéntricos).

4.3.1. Calibración del equipo

Previamente en el laboratorio, se tomaron las medidas del infiltrómetro (cilindro interior y exterior) y se determinó la capacidad de volumen en los dos anillos concéntricos, para la realización de repetidos ensayos para la correcta colocación del infiltrómetro en el suelo (hincado y nivelado), así como la cantidad adecuada de agua que se requiere en cada cilindro, con la finalidad de no cometer ningún tipo de error en su llenado.

La calibración se llevó a cabo en el Campus de la Facultad de Ciencias de la Tierra de la U.A.N.L., en donde se encontraron suelos vertisoles de uso rural, en este se hicieron diversas pruebas de infiltración, análisis granulométricos, contenido de humedad de cada muestra, así como también se determinó la variabilidad espacial y temporal con la finalidad de calibrar el equipo para las posteriores análisis en campo.

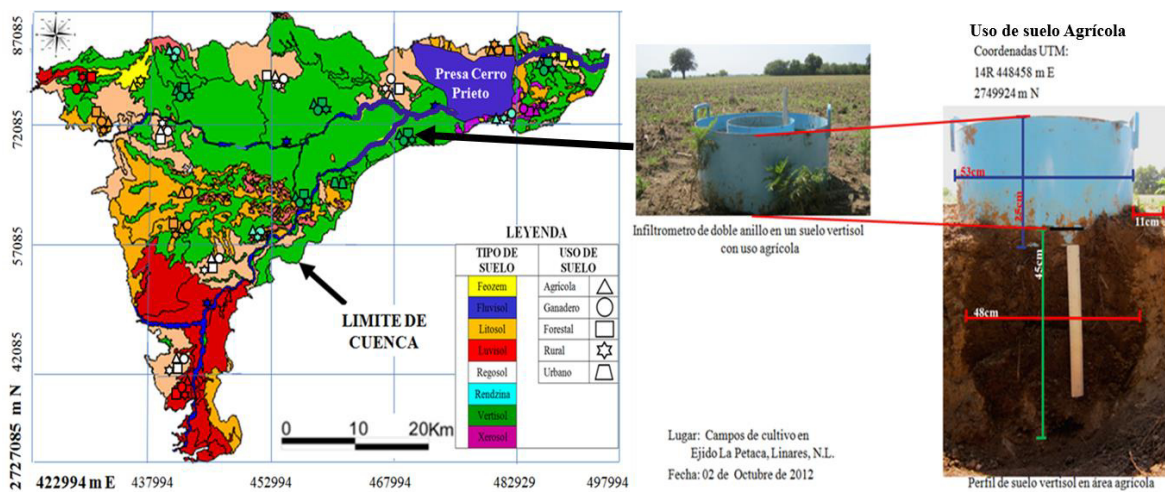


Figura 4.2. Determinación del frente de humedad con el infiltrómetro de doble anillo en un suelo de tipo vertisol en un área de uso agrícola.

4.4. Sitios de muestreo

Se seleccionaron 140 puntos de muestreo distribuidos en los 8 diferentes tipos de suelo (feozem, fluvisol, litosol, luvisol, regosol, rendzina, vertisol y xerosol) y los 5 usos de suelo (Agrícola, Ganadero, Forestal, Rural y Urbano), haciendo 5 muestreos en cada una de las combinaciones. Cabe mencionar que el tipo de suelo fluvisol solo contaba con un único uso de suelo, mientras que otros usos de suelo solo se practican en determinados tipos de suelo, por tal motivo no se cuenta con la totalidad de sitios de muestreo que sería de 200 sitios.

La selección de los sitios para la aplicación de la prueba de infiltración y la obtención de las muestras de suelo, se realizaron al azar (dentro de cada tipo y uso de suelo) en lugares representativos a las áreas (con la finalidad de evitar los sesgos en la información).

Se tomó la decisión de colocar el infiltrómetro de doble anillo en los lugares más representativos de los sitios de muestreo, considerando que en la colocación del equipo se debía de estar alejado por lo menos 5 metros de cualquier variable como lo son; los árboles, caminos, senderos, sobre grietas de expansión-contracción, etc., en los suelos con contenido

de materia orgánica superficial, ésta se retiró del lugar, así como la vegetación herbácea se cortó el material vegetativo a ras de suelo (sin alterar al mismo) para evitar cubicar erróneamente la cantidad de agua necesaria para la realización de las prueba.

4.5. Toma de datos en campo y laboratorio

Para la colocación de este instrumento se requiere remover la materia orgánica que se encuentre en el área donde se ubicara el infiltrómetro (sin perturbar el suelo), una vez que se coloque el instrumento se requiere que las orillas biseladas penetren a una profundidad de 5 cm, para esto se requiere que se encuentre nivelado, para que el agua se introduzca uniformemente en el suelo.

Una vez que el infiltrómetro se encuentra hincado en el suelo, se coloca la regla graduada en el anillo interior (para la toma de las lecturas) y posteriormente se vierte el agua en los cilindros (interior y exterior) a la misma velocidad a una medida estándar (para todos los sitios). Posteriormente se inicia el cronometro tomando el tiempo transcurrido cada 5 mm de infiltración hasta la total infiltración del agua.



Figura 4.3. Fotografía de la colocación del infiltrómetro de doble anillo en una área de uso agrícola de tipo de suelo vertisol (sin materia orgánica en el interior de los cilindros para evitar una lectura errónea en la información).

4.5.1. Tipo de vegetación natural en el área de estudio

El tipo de vegetación característico es el matorral sub-montano y el matorral espinoso tamaulipeco (INEGI, 1981). La vegetación que se encuentra en los municipios de Linares y Hualahuis, Nuevo León cubre alrededor de un 35% de su superficie total y se incluyen los siguientes tipos de vegetación afines al matorral: Matorral alto subinorme de *Helietta parvifolia* con *Diospyros palmeri*; matorral alto subinorme de *H. parvifolia* con *Capparis incana*; matorral mediano subinorme con *Cordia boissieri* y *Pithecellobium brevifolium*; matorral alto espinoso con espinas laterales *Acacia regidula* y *A. berlandieri*; y el bosque caducifolio espinoso de *Prosopis glandulosa* con *Acacia berlandieri*. Así como también matorral alto subinorme con una comunidad vegetal denominada por arbustos con alturas de tres a cinco metros distribuida a partir de la Sierra Madre Oriental desde Monterrey hasta Tamaulipas en su parte Norte (García y Jurado, 2008), este tipo de vegetación fue la que se reconoció en el recorrido del presente estudio.



Figura 4. 4. Vegetación Natural predominante en Ejido Vista Hermosa, Linares, N.L.

4.5.2. Pendiente en los tipos de suelo

En cada sitio de muestreo se realizaron 10 repeticiones de lectura en diferentes partes del terreno (en cada tipo y uso de suelo, con cada una de sus combinaciones) para determinar la pendiente general del área, utilizando una Brújula Geológica Tipo Brunton con su parte de Clinómetro, colocando ésta, sobre una madera sobre el suelo desnudo para obtener la información. Una vez teniendo esos valores fueron promediados para generalizar la superficie de estudio.

4.5.3. Compactación del suelo

El proceso de compactación es un punto fundamental a tratar para complementar el concepto de medición de densidad. En este proceso se eliminan los espacios vacíos y contenido de humedad para que el suelo se distribuya lo mejor posible con las partículas unidas. Por ello, la compactación se logra por medio de la aplicación de cierta cantidad de energía al suelo por medio de equipo mecánico o electromecánico y de esa manera aumentar de su densidad y estabilidad. El principal objetivo de la compactación es el mejoramiento de las propiedades mecánicas del suelo. Es fundamental en la construcción de estructuras sobre el suelo ya que mejorará las propiedades del mismo y asegurará la estabilidad de la construcción sobre él (Guzmán, 2013).

4.5.4. Otros parámetros del terreno evaluados

Para hacer un análisis más completo se evaluaron los siguientes factores: Árboles, herbáceas, arbustos, cultivos, pastizal, matorral, materia orgánica, desmonte y labranza (solo para considerar su existencia o ausencia), con la finalidad de tener una mejor comprensión acerca de los posibles factores que pudieran influir indirectamente en el proceso de infiltración.

4.5.5. Granulometría de los suelos

Se aplicó *el método granulométrico de cribas* para la determinación de la granulometría en los suelos, para ello, se realizaron las pruebas en el laboratorio siguiendo los procedimientos utilizados en la Norma ASTM International (*American Society for Testing and Materials*) D422 (ASTM, 2007). El tamaño de todas las muestras de suelos extraídas fueron de 2.5 kg, en cada uno de los sitios de estudio (correspondiente a la delimitación, tipo y uso de suelo). La extracción de suelo fue a una profundidad de hasta 25cm, se empaquetaron en bolsas de plástico (marcadas y clasificadas) para su traslado al área del laboratorio de suelos de la FCT/UANL para su secado.

El material se mezcla para homogenizar el suelo, se limpia de cualquier materia orgánica y fragmentos de rocas que pueda contener, se pulveriza con un martillo de goma y se pone a secar extendiendo el material y dejándolo a temperatura ambiente por tiempo prolongado de varios días a la intemperie. Se cuartea la muestra, después, se toman pequeñas cantidades de un extremo, del extremo opuesto, hasta completar la cantidad necesaria para realizar la muestra. El material se pesa en la balanza electrónica (con exactitud de 0.1 g) y se registra como el peso seco inicial de 1.5kg de suelo. Las cribas de distintos diámetros se apilan una sobre otra en un orden descendiente según los distintos tamaños, quedando arriba la criba con mayor diámetro (Tamiz No. 10 equivalente a 2mm) y abajo la de menor diámetro (Tamiz No. 635 equivalente a 0.025mm). El material se deposita sobre las cribas, estas se tapan y se colocan en la máquina vibradora, la cual funcionará por aproximadamente 15 minutos. Posteriormente se pesan las cantidades de material retenido en cada una de las mallas. Se registra la información. Al sumar el total de pesos registrados la cantidad debe ser casi igual al peso seco inicial (se tolerará una pérdida de no más del 3% de la muestra).

Tabla 4. 1. Número de tamiz de cada criba y su equivalencia en pulgadas, centímetros, milímetros y micras.

c	10	12	14	16	20	30	40	50	60	70	80	100	200	400	500	635
Pulg	0.078	0.066	0.056	0.047	0.033	0.0234	0.016	0.012	0.01	0.008	0.01	0.006	0.003	0.002	0.001	0.0008
Cm	0.2	0.168	0.141	0.119	0.084	0.059	0.042	0.03	0.025	0.021	0.02	0.015	0.007	0.004	0.003	0.002
mm	1.999	1.679	1.41	1.191	0.841	0.594	0.419	0.297	0.249	0.211	0.18	0.15	0.074	0.038	0.025	0.02
Micra	1999	1679	1410	1191	840.7	594.36	419.1	297.2	248.9	210.8	178	149.9	73.66	38.1	25.4	20.066

La información obtenida del análisis granulométrico se presenta en forma de curva. De cada sitio de muestreo se elaboró una gráfica semilogarítmica del tamaño de la partícula (en mm) contra el porcentaje acumulado.

4.5.6. Metodología de laboratorio para determinar la textura en los suelos

Para la determinación de la textura en el presente trabajo, se utilizó la información del método granulométrico de cribas (utilizando el proceso de la Norma ASTM D422). Una vez obteniendo la información de la granulometría correspondiente a los porcentajes de arcilla, limo y arena se procedió a ubicar esos datos, en el triángulo de texturas, para determinar el tipo de textura que presenta cada muestra.

4.5.7. Determinación del contenido de humedad del suelo

Para el presente trabajo se aplicó *el método gravimétrico*, que es el método más exacto, el cual se basa en la medición del peso de muestras de suelo antes y después de someterse a un proceso de secado en un ambiente controlado (en el laboratorio).

Es el método directo que se utilizó para estimar el contenido de humedad en el suelo y es el estándar con el cual son comparados otros sistemas de estimación de humedad (ya que es el método más exacto), el cual se basa en la medición del peso de muestras de suelo antes y después de someterse a un proceso de secado. Para la aplicación de este método se

toma una pequeña muestra de suelo (150 a 200 gr) la cual se deposita en un pequeño frasco (capsula de aluminio) que se cierra herméticamente (con una porción de película plástica auto adherible alrededor) para evitar la pérdida de humedad; las muestras una vez que han sido debidamente etiquetadas con los datos del sitio de muestreo se llevan al laboratorio donde se pesan y posteriormente se introducen las capsulas destapadas en una estufa eléctrica que se encuentra a una temperatura de 105 °C constante donde permanecerán por 24 horas para su posterior pesaje.

El contenido de humedad (W) de cada muestra se calcula con la siguiente fórmula (González, 2011):

$$W (\%) = \frac{\text{Peso de suelo húmedo} - \text{Peso de suelo}}{\text{Peso de suelo seco}} \quad (4.1)$$

$$W (\%) = \frac{\text{Peso del agua}}{\text{Peso de suelo seco}} \times 100 \quad (4.2)$$

4.5.8. Determinación de la densidad del suelo

Se aplicó el método del cilindro, el cual consiste en extraer una porción de volumen del suelo (tratando de evitar el menor impacto sobre la muestra que se extrae) con un cilindro biselado (en la parte inferior) y con las dimensiones de 5 cm de alto, 5,3 cm de diámetro y un volumen de 100 cm³, en el cual este cilindro se incrusta a ras de suelo debido a que reciben el impacto con un martillo de hierro cubierto de caucho de un peso de 2,5 kg desde una altura de 30 cm., introduciendo este en el suelo en cada uno de los sitios de muestreo y posteriormente se extrae la muestra cubriendo el cilindro con una porción de película plástica auto adherible alrededor, con la finalidad de evitar que se pierda la humedad y después de tomada la muestra, se lleva al laboratorio para proceder a su secado en la estufa a una temperatura de 105°C. constante durante 24 horas, una vez secas se pesan a temperatura ambiente y el resultado se divide por el volumen del cilindro (Donald y Lobo, 2011).

$$da = \frac{\text{Peso seco del suelo}}{\text{Volumen del cilindro}} \quad (4.3)$$

donde:

da: Densidad aparente



Figura 4.5. Fotografía adquiriendo una muestra de suelo, utilizando el método de cilindro.

4.6. Análisis de la información de campo y laboratorio

De las diversas técnicas para realizar los tipos de muestreos se utilizó el *muestreo aleatorio*, debido a que es el más importante ya que evita el problema de la falta de representatividad y realiza deducciones validas sobre la totalidad que se requiere representar.

Se aplicó estadística inferencial debido a que esta analiza las muestras tomadas, utilizando parámetros así como variables cuantitativas discretas y continuas (según sea el caso), descartando las variables cualitativas (Hurtado, 2012).

Los datos obtenidos fueron analizados aplicando las pruebas de Shapiro-Wilks, Correlaciones con el método de Spearman, Análisis de correspondencia canónica, Regresiones, Pruebas de Kruskal-Walis, y Análisis de Clúster, teniendo como variable resultante la velocidad de Infiltración.

4.6.1. Método de Regresión para calcular tasas de infiltración

Con el fin de evaluar la tasa de infiltración del suelo en milímetros por hora, se aplicaron regresiones de la tasa de infiltración a través del tiempo en cada prueba (ver anexos). El método utilizado para en la elección del tipo de regresión fue el de ajuste por mínimos cuadrados, el cual postula que la mejor recta que pasa por los puntos (pares ordenados x , y) será aquella cuya suma de los cuadrados de los residuos sea mínima o tienda a cero.

El coeficiente de determinación se aplicó para medir el poder explicativo del modelo de regresión donde la variable en Y explica la variación en X del conjunto de datos asignándoles el valor de r^2 , a $> r^2$ mayor poder explicativo de las variables (Hurtado, 2012). Para el presente estudio se utilizaron regresiones del tipo potencial y logarítmica para la estimación de la infiltración en cada prueba, ya que estas fueron las que presentaron un mayor coeficiente de determinación.

4.6.2. Pruebas de Normalidad

Los valores de infiltración se evaluaron mediante pruebas de normalidad de Shapiro-Wilks ya que estos estuvieron agrupados en categorías de tipo y uso de suelo y estas categorías se comprendieron por grupos menores a 50 datos, Debido a que estas pruebas muestran que no existe normalidad en los datos de infiltración (ver Anexos), se decidió trabajar con estadística no paramétrica.

4.6.3. Coeficiente de correlación

Para la medición de las relaciones entre la infiltración y las variables físicas del suelo, se aplicó el coeficiente de Spearman, ya que las variables no presentaron una distribución semejante a la de la curva normal, este coeficiente mide el grado de asociación entre dos variables no-paramétricas ordenadas en rangos con orden creciente o descendente (Reynaga, 2011; Acuña, 2009).

4.6.4. Correlación Canónica

Para graficar la relación multivalente entre los factores evaluados se aplicó el análisis de relación canónica (es un tipo de análisis estadístico lineal de múltiples variables), el objetivo de la correlación canónica fue solamente graficar las relaciones, en este caso entre los dos conjuntos de variables y la infiltración. El resultado son la generación de vectores aleatorios generalizando las correlaciones correspondientes (Badii *et al.*, 2007; Cuadras, 2014).

4.6.5. Análisis de Factores

Para la evaluación de diferencias en el potencial de infiltración en diferentes tipos y usos de suelo, se utilizó el análisis de Kruskal-Wallis debido a que este método corresponde a una prueba de hipótesis no paramétrica para dos o más muestras independientes (Lejarza y Lejarza, 2014).

4.6.6. Análisis de Clúster

Se utilizó el análisis de clúster para agrupar elementos en grupos homogéneos en función de sus similitudes, para ello se aplicó una clasificación de variables, La cual es aplicable con muchas variables para hacer una división en grupos y posteriormente reducir la dimensión (Ayuga, 2008).

Antes de realizar el análisis de clúster primero se estandarizaron (o transformaron) los datos mediante la raíz cuadrada, para eliminar los prejuicios de las diferencias en las escalas de los distintos atributos (variables), esto con la finalidad que no afecten el resultado del análisis (Lucendo, 2007).

La medida de distancia que se utilizó para el agrupamiento de la información fue el de la *Distancia euclidiana al cuadrado*, la cual es la suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores de las variables (Prado, 2009).

$$EUCLID(X, Y) = \sqrt{\sum_i (X_i - Y_i)^2} \quad (4.4)$$

El método utilizado para la construcción de clústeres fue el de varianzas mínimas de Ward. En donde la distancia entre dos clúster se calcula como la suma de cuadrados entre grupos en el ANOVA sumado para todas las variables.

4.6.7. Software estadístico

Para el análisis y procesamiento de los datos obtenidos en esta investigación, se utilizó el Software R-project para la realización las pruebas de Shapiro-Wilks, las pruebas de Kruskal-Wallis, y análisis de Correlación con el método Spearman, las gráficas de las regresiones se hicieron con el programa SPSS, mientras que los análisis de correlación canónica y de clúster se realizaron con los softwares Canoco y MVSP respectivamente.

4.6.8. Integración de la información en un sistema de información geográfica

Con toda la información obtenida de campo y laboratorio se generaron mapas de potencial de infiltración en los suelos en la región de Linares-Hualahuises, para el caso específico de la parte baja de la Cuenca del Rio Pabillo, en Nuevo León, utilizando el Softwar ArcGIS.

CAPÍTULO V

RESULTADOS

5.1. Tipos de suelo presentes en el área de estudio

Los siguientes tipos de suelo son localizados en la parte baja de la cuenca del Río Pabllillo: Feozem, Fluvisol, Litosol, Luvisol, Regosol, Rendzina, Vertisol y Xerosol. Se tomaron en cuenta un total de 140 sitios, en los cuales se tomaron diferentes parámetros y muestras para los análisis correspondientes (Tabla 5.1, Figura 5.1).

Tabla 5.1. Localización de los sitios distribuidos en los 8 tipos y los 5 usos de suelo, haciendo 5 muestreos en cada una de las combinaciones, en diferentes localidades.

Tipo de suelo	Uso de suelo	Municipio	Localidades (Metros sobre el nivel del mar)
Feozem	Agrícola	<u>Hualahuises</u> y Linares	<u>Paso Lajas</u> (285) y Leones (262)
Feozem	Ganadero	Linares	Leones (264)
Feozem	Forestal	Linares	Leones (263)
Feozem	Rural	<u>Hualahuises</u> y Linares	<u>Paso Lajas</u> (288) y Leones (261)
Fluvisol	Rural	Linares	Camacho (340), Leones (263), El Popote (308) y Vista Hermosa (450)
Litosol	Agrícola	Linares y <u>Hualahuises</u>	La Parrita (470), La Ciénaga (480), la Cebadilla (450) y <u>La Laja</u> (418)
Litosol	Ganadero	Linares y <u>Hualahuises</u>	La Parrita (472), La Ciénaga (477), la Cebadilla (453) y <u>La Laja</u> (417)
Litosol	Forestal	Linares y <u>Hualahuises</u>	La Parrita (479), La Ciénaga (489), la Cebadilla (456) y <u>La Laja</u> (417)
Litosol	Rural	Linares y <u>Hualahuises</u>	La Parrita (476), La Ciénaga (478), la Cebadilla (452) y <u>La Laja</u> (418)
Luvisol	Agrícola	<u>Hualahuises</u> y Linares	<u>La Laja</u> (420) y Los Álamos (541)
Luvisol	Ganadero	<u>Hualahuises</u> y Linares	<u>La Laja</u> (417) y Los Álamos (539)
Luvisol	Forestal	<u>Hualahuises</u> y Linares	<u>La Laja</u> (427) y Los Álamos (545)
Luvisol	Rural	<u>Hualahuises</u> y Linares	<u>La Laja</u> (424) y Los Álamos (547)
Regosol	Agrícola	Linares y <u>Hualahuises</u>	Los Álamos (538), Carricitos (460), <u>Hualahuises</u> (363), Emiliano Zapata (350) y La Escondida (315)
Regosol	Ganadero	Linares y <u>Hualahuises</u>	Los Álamos (536), Carricitos (462), <u>Hualahuises</u> (365), Emiliano Zapata (354) y La Escondida (316)
Regosol	Forestal	Linares y <u>Hualahuises</u>	Los Álamos (549), Carricitos (461), <u>Hualahuises</u> (367), Emiliano Zapata (353) y La Escondida (317)

Regosol	Rural	Linares y Hualahuises	Los Álamos (540), Carricitos (464), Hualahuises (362), Emiliano Zapata (353) y La Escondida (316)
Rendzina	Agrícola	Linares	Col. La Unión (390) y El Poblado (280)
Rendzina	Ganadero	Linares	Col. La Unión (389) y El Poblado (283)
Rendzina	Rural	Linares	Col. La Unión (390) y El Poblado (281)
Vertisol	Agrícola	Linares y Hualahuises	La Petaca (308), Santo Domingo (370), Paso Lajas (289), Emiliano Zapata (351) y Leones (263)
Vertisol	Ganadero	Linares y Hualahuises	La Petaca (307), Santo Domingo (374), Paso Lajas (285), Emiliano Zapata (351) y Leones (264)
Vertisol	Forestal	Linares y Hualahuises	La Petaca (314), Santo Domingo (373), Paso Lajas (283), Emiliano Zapata (353) y Leones (262)
Vertisol	Rural	Linares y Hualahuises	La Petaca (310), Santo Domingo (368), Paso Lajas (284), Emiliano Zapata (350) y Leones (262)
Vertisol	Urbano	Linares	Las Brisas (328)
Xerosol	Agrícola	Linares	El Cascajoso (275)
Xerosol	Ganadero	Linares	El Cascajoso (276)
Xerosol	Rural	Linares	El Cascajoso (278)

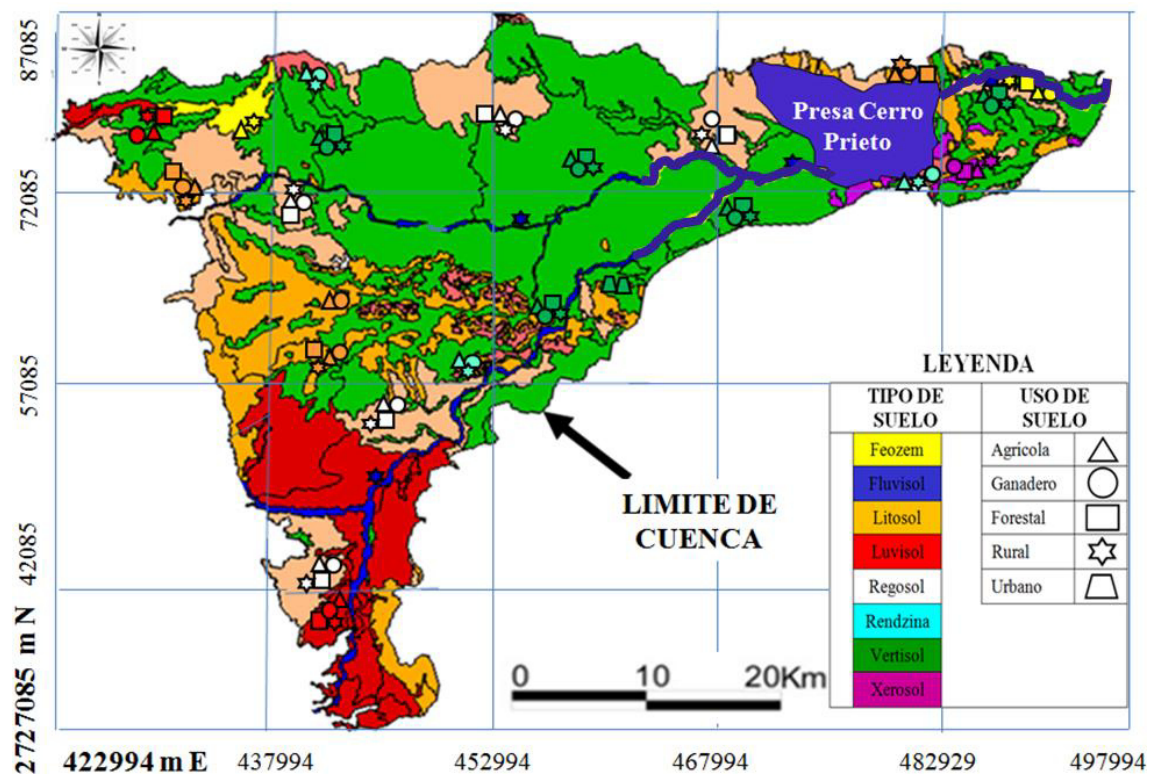


Figura 5. 1. Localización de los sitios de muestreo en la parte baja de la cuenca del Río Pablillo.

5.2. Análisis granulométrico y textura en los suelos

Para los datos correspondientes al contenido de arena, limo y arcilla se aplicó el análisis granulométrico, para ello se utilizó el método de tamizado, por el cual se determinó cuantitativamente la distribución de tamaño de partículas (arcillas, limos y arenas) de suelo.

En las pruebas no paramétricas de análisis de factores (Kruskal-Wallis) se evaluaron las diferencias en cuanto a la granulometría en los diferentes tipos y usos de suelos.

Se obtuvo que en los suelos de tipo regosol y litosol y de uso de suelo forestal presentan un mayor contenido de arena; en los suelos feozem y rendzina y el uso de suelo rural, agrícola y ganadero presentan un mayor contenido de limo; mientras que los suelos vertisol, luvisol y fluvisol y el uso de suelo urbano presentan un mayor contenido de arcillas (Las siguientes 6 figuras).

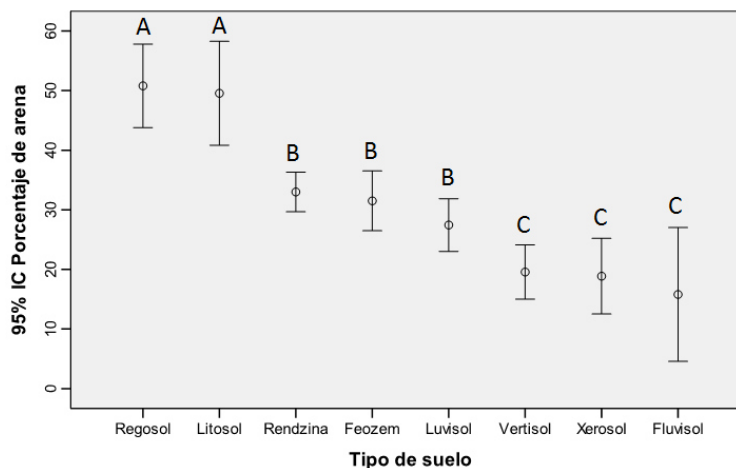


Figura 5.2. Gráfico de error de datos de campo correspondientes a la variable arena (%) en diferentes tipos de suelo. Se muestran las agrupaciones obtenidas mediante el análisis de Kruskal-Wallis con letras de la “A” a la “C”. N=140.

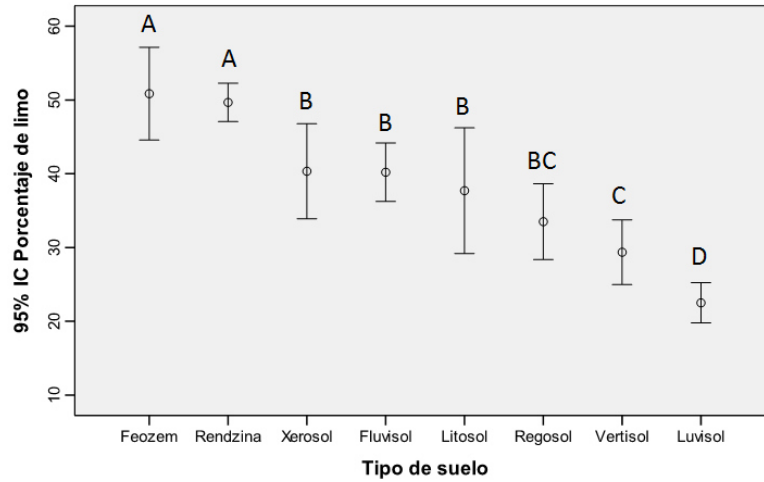


Figura 5. 3. Gráfico de error para los datos de campo correspondientes a la variable limo (%) en diferentes tipos de suelo. Se muestran las agrupaciones obtenidas mediante el análisis de Kruskal-Wallis con letras de la “A” a la “D”. N= 140.

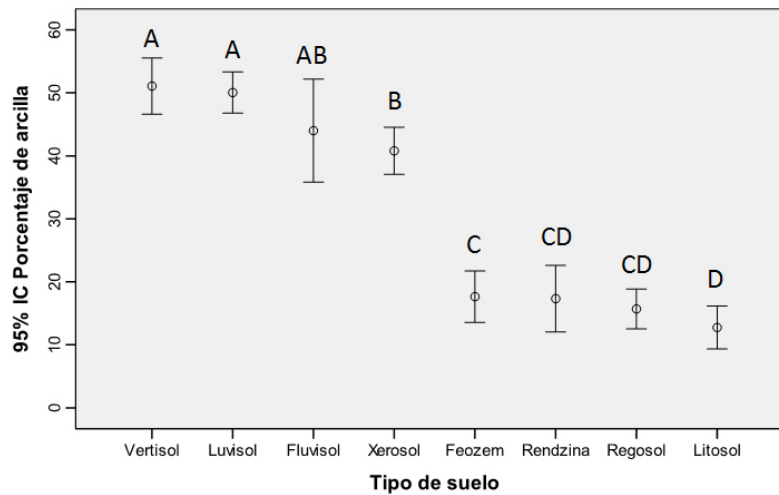


Figura 5. 4. Gráfico de error para los datos de campo correspondientes a la variable arcilla (%) en diferentes tipos de suelo. Se muestran las agrupaciones obtenidas mediante el análisis de Kruskal-Wallis con letras de la “A” a la “D”. N=140.

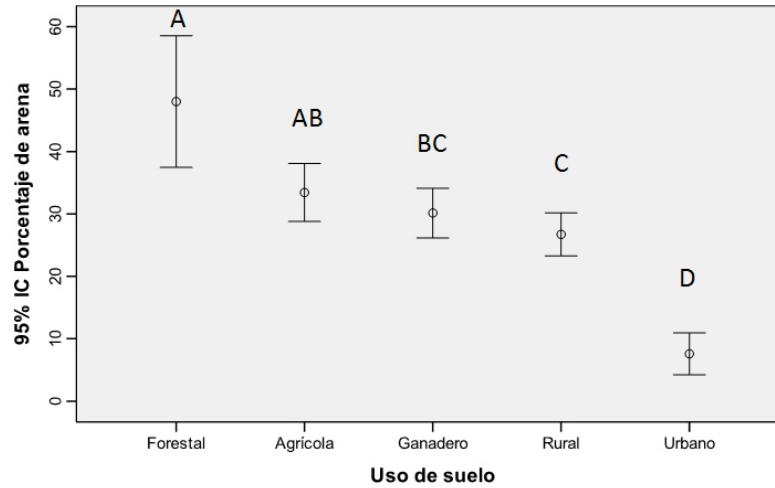


Figura 5.5. Gráfico de error para los datos de campo correspondientes a la variable arena (%) en diferentes usos de suelo. Se muestran las agrupaciones obtenidas mediante el análisis de Kruskal-Wallis con letras de la “A” a la “D”. N=140.

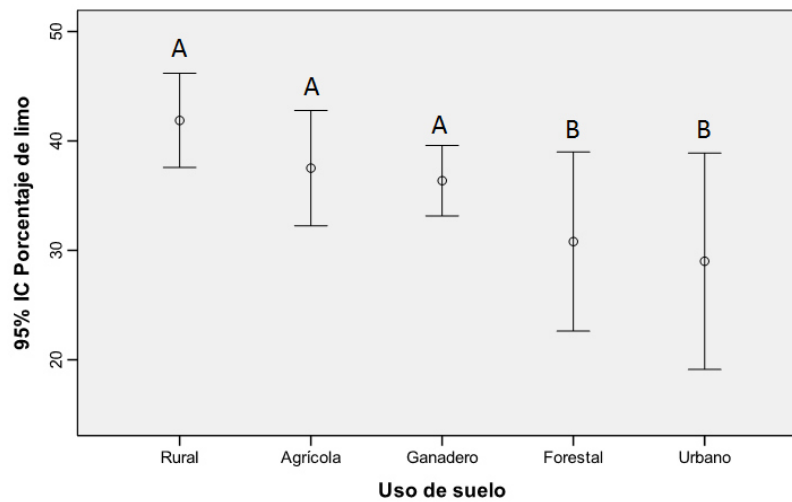


Figura 5.6. Gráfico de error para los datos de campo correspondientes a la variable limo (%) en diferentes usos de suelo. Se muestran las agrupaciones obtenidas mediante el análisis de Kruskal-Wallis con letras de la “A” a la “B”. N=140.

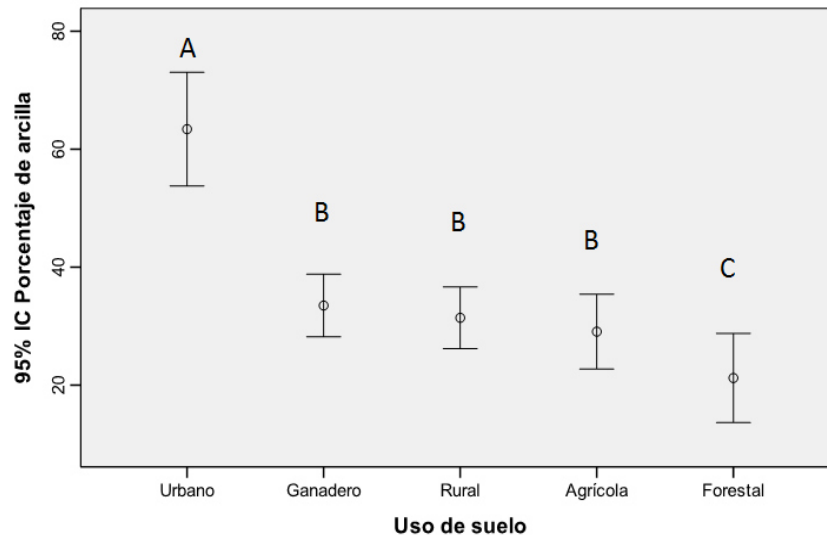


Figura 5. 7. Gráfico de error para los datos de campo correspondientes a la variable arcilla (%) en diferentes usos de suelo. Se muestran las agrupaciones obtenidas mediante el análisis de Kruskal-Wallis con letras de la “A” a la “C”. N=140.

La información de la granulometría se utilizó para conocer la textura de las muestra de suelo, para ello se utilizó el diagrama triangular para posicionar los resultados del análisis textural de suelos:

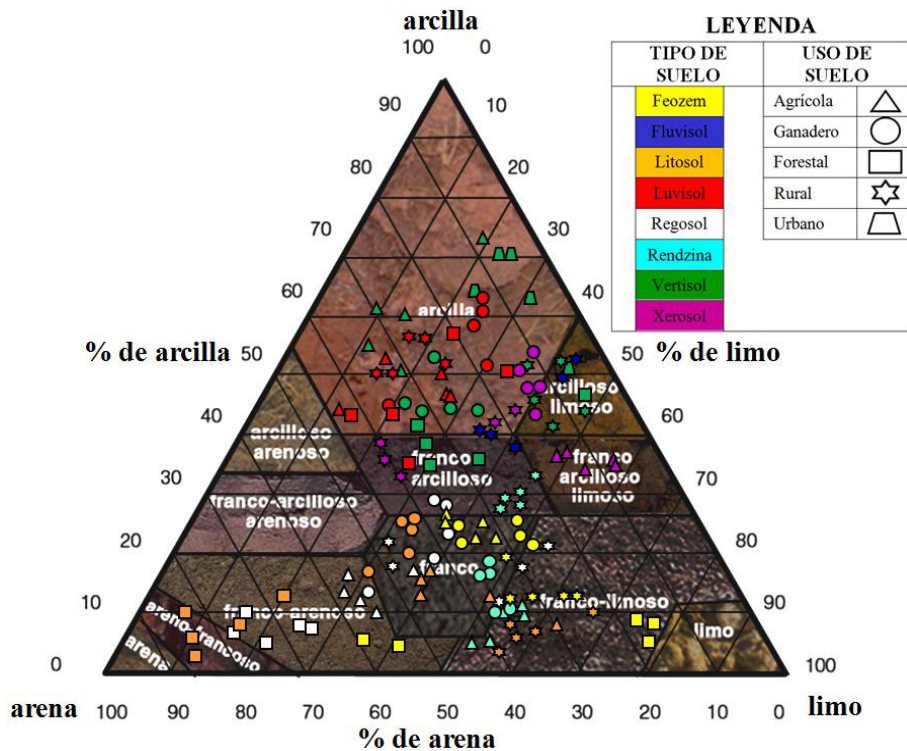


Figura 5. 8. Granulometría de los suelos evaluados en el área de estudio.

5.3. Contenido de humedad de los suelos

En las pruebas no paramétricas de análisis de factores (kruskal wallis) para evaluar diferencias en cuanto al contenido de humedad en los diferentes tipos y usos de suelos se obtuvieron 2 grupos (A y B) con distinto porcentaje de humedad en ambas pruebas.

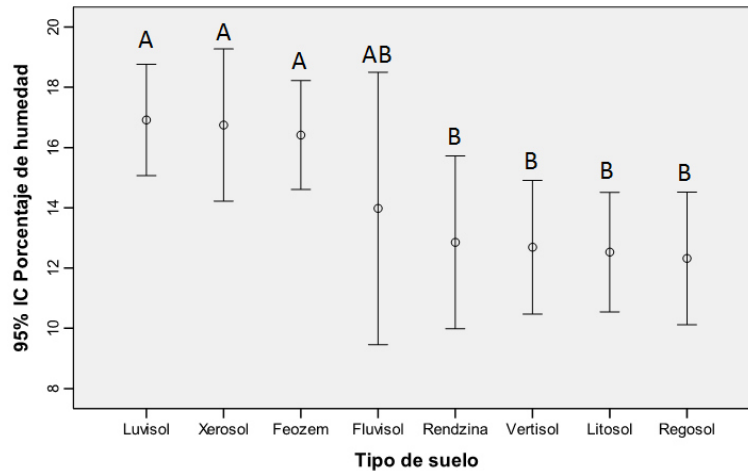


Figura 5.9. Gráfico de error para los datos de campo correspondientes a la variable humedad (%) en diferentes tipos de suelo. Se muestran las agrupaciones obtenidas mediante el análisis de Kruskal-Wallis con letras de la “A” a la “B”. N=140.

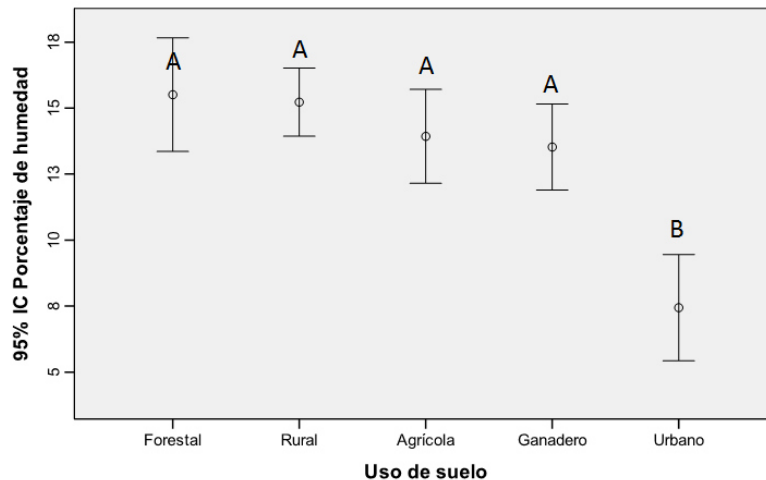


Figura 5.10. Gráfico de error para los datos de campo correspondientes a la variable humedad (%) en diferentes usos de suelo. Se muestran las agrupaciones obtenidas mediante el análisis de Kruskal-Wallis con letras de la “A” a la “B”. N=140.

5.4. Densidad de los suelos

En los análisis de kruskal wallis para evaluar diferencias en cuanto a la densidad en los diferentes tipos y usos de suelos se obtuvo que, los tipos de suelo fluvisol, xerosol y el uso urbano presentaron una mayor densidad; mientras los suelos regosol, litosol, rendzina y el uso forestal presentaron un menor densidad (Figuras 5.11 y 5.13).

Además se elaboró una a clasificación (análisis clúster) en donde se agruparon combinaciones de uso y tipo de suelo con distintos niveles de densidad del suelo, en esta clasificación se generaron cuatro grupos en donde el grupo uno, es el que presenta niveles más altos de densidad, y la densidad disminuye hasta llegar al grupo cuatro en donde las combinaciones de tipo y uso de suelo fueron aquellas con menor densidad para las muestras evaluadas. (Figura 5.13). Los tipos de suelo se abrevian .los tipos y usos de suelo evaluados se presentan abreviados de la siguiente forma: Feozem=Fz, Fluvisol=Fv, Litosol=Lt, Luvisol=Lv, Regosol=Rg, Rendzina=Rz, Vertisol=Vt, Xerosol=Xe, Agrícola=Agri, Forestal=Fore, Ganadero=Gan, Rural=Rur y Urbano=Urb.

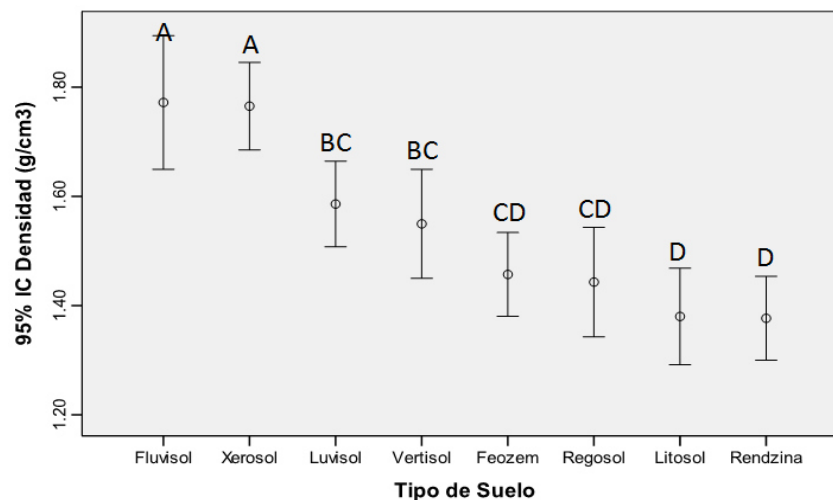


Figura 5.11. Gráfico de error para los datos de campo correspondientes a la variable densidad (g/cm^3) en diferentes tipos de suelo. Se muestran agrupaciones obtenidas mediante el análisis de Kruskal-Wallis con letras de la "A" a la "D". N=140.

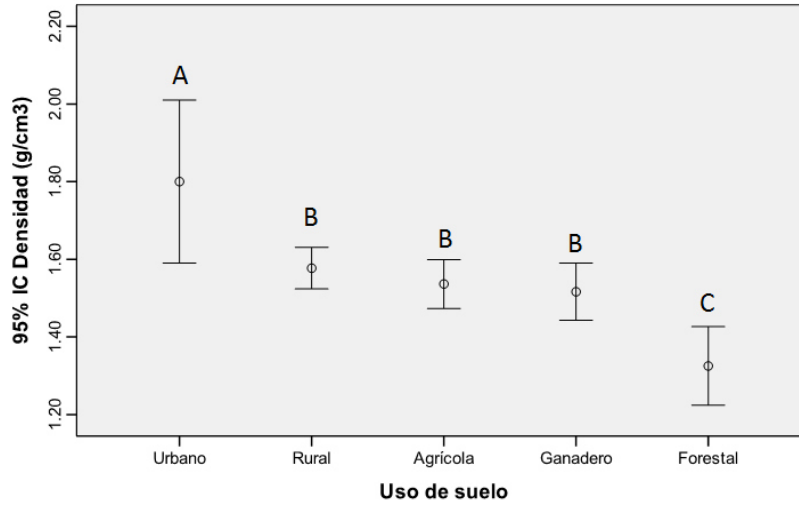


Figura 5.12. Gráfico de error para los datos de campo correspondientes a la variable densidad (g/cm^3) en diferentes usos de suelo. Se muestran agrupaciones obtenidas mediante el análisis de Kruskal-Wallis con letras de la “A” a la “C”. N=140.

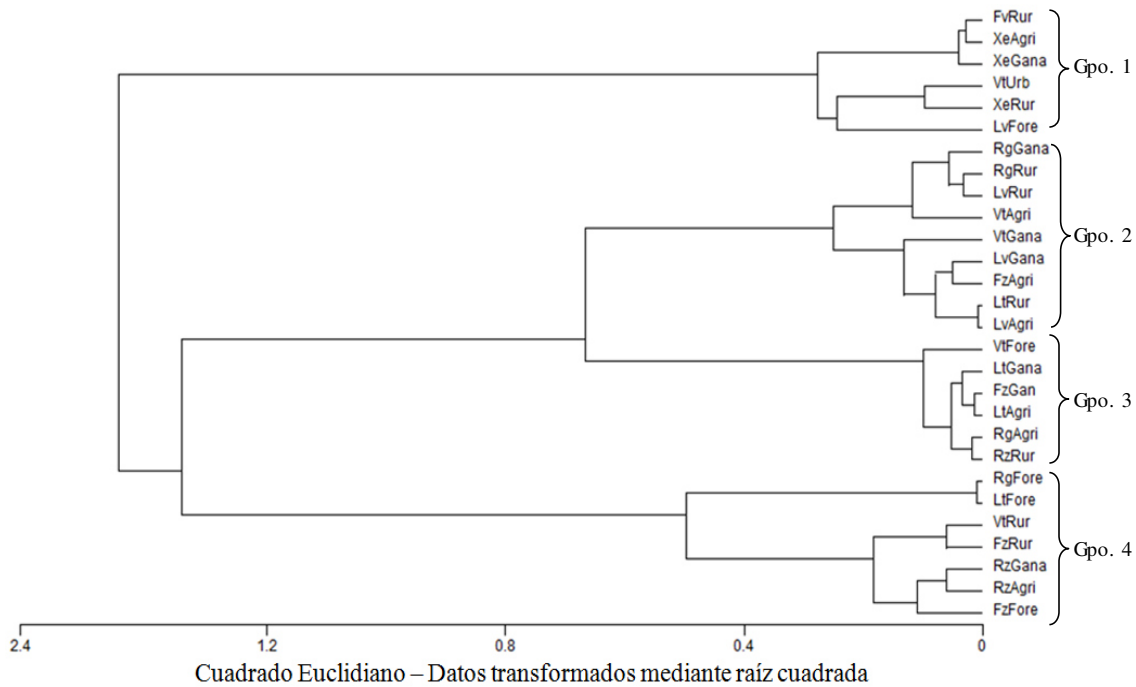


Figura 5.13. Análisis clúster de las densidades de los suelos en distintos tipos y usos de suelo dentro del área de estudio.

5.5. Variables que influyen en la infiltración de los Suelos

Para los datos de los parámetros físicos evaluados en campo (herbáceas, arbustos, árboles, cultivos, pastizal, matorral, materia orgánica, desmonte y labranza) se realizó un análisis de correspondencia canónica con el fin de determinar la relación de cada una de ellas en el proceso de infiltración (fig.1). Además de evaluar el coeficiente de correlación de cada parámetro por la método estadístico de Sperman (Tabla 1).

Se notaron 4 correlaciones significativas entre las variables evaluadas y la infiltración, las cuales fueron: la densidad del suelo ($P < 0.001$), que tiene una relación negativa; la arena ($P = 0.0001$), que tiene una relación positiva; la arcilla ($P = 0.0002$), que tiene una relación negativa y los árboles ($P = 0.3949$), que tienen una relación positiva (Tabla 1.). La variable humedad no influyó en los resultados ($R = -0.24$, $P = 0.21$) debido a que los muestreos en campo se realizaron en la estación del año de verano (y no en épocas de alta humedad o lluvias).

Tabla 5. 2. Coeficientes de correlación R, con respecto a la infiltración del suelo para cada parámetro evaluado en campo.

	Densidad	Humedad	Arena	Limo	Arcilla	Labranza	Desmonte	M.O.
R	-0.8584	-0.2445	0.6645	-0.2933	-0.6396	0.1846	-0.0531	0.2464
P	< 0.001	0.21	0.0001	0.1298	0.0002	0.3469	0.6886	0.2063
	Matorral	Pastizal	Cultivo	Arbustos	Árboles	Pendiente		
R	0.1340	0.1264	0.0664	-0.1340	0.3949	0.2165		
P	0.4965	0.5217	0.7372	0.4965	0.0375	0.2684		

*Valores de $P < 0.05$ indican una correlación significativa.

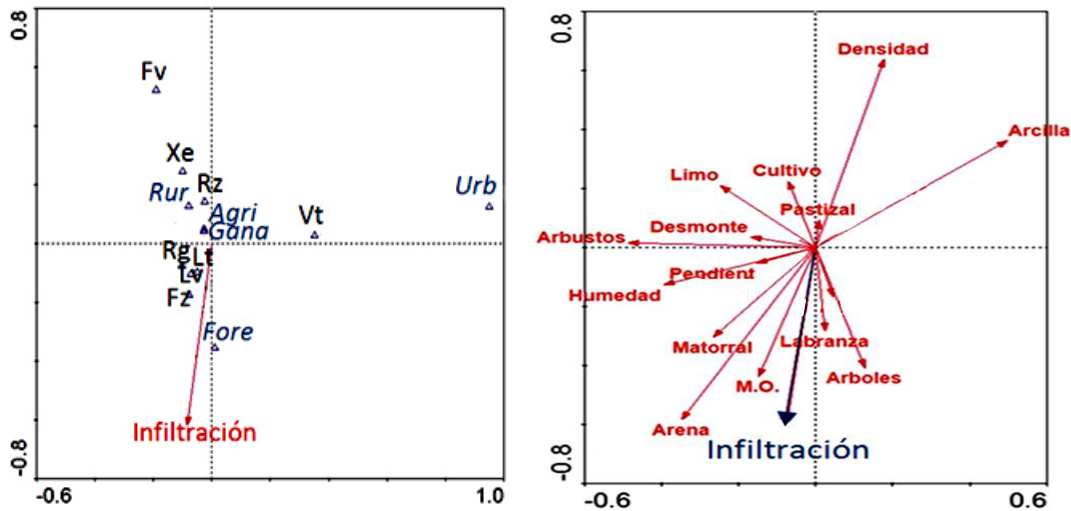


Figura 5. 14. Correspondencia canónica para la infiltración y los tipos y usos de suelo, ejes 1 y 2, índice de descripción gráfico 0.98.

Se realizaron regresiones no lineales de la infiltración y las variables de suelo que tuvieron una correlación significativa (ver Tabla 5.2). Estas fueron la densidad y la textura de suelo (arena y arcilla), no se realizó un análisis de regresión para la variable árboles, debido a que esta es una variable dicotómica (de sitios con presencia o ausencia de árboles). Al aplicar las regresiones (Fig. 2), se observó el coeficiente de determinación de cada parámetro, destacando con los valores más altos las variables densidad con un 76% de determinación y el contenido de arena del suelo con un 58% de determinación.

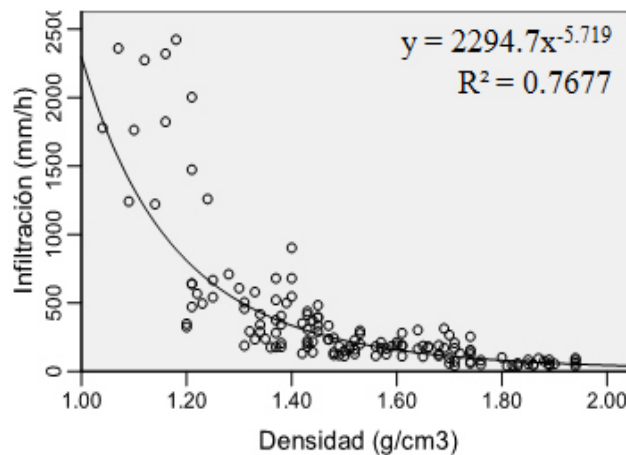


Figura 5. 15. Análisis de regresión para la densidad de los suelos con la infiltración. N=140.

Este análisis muestra como la infiltración está determinada negativamente por la densidad y la arcilla es decir, a mayor densidad o contenido de arcilla en los suelos se tiene una menor infiltración, la cual está determinada por funciones de tipo potencial (Fig. densidad y arcilla). Por otra parte, el contenido de arena se relaciona positivamente con la infiltración dando como resultado una función de tipo exponencial (Fig. de la arena).

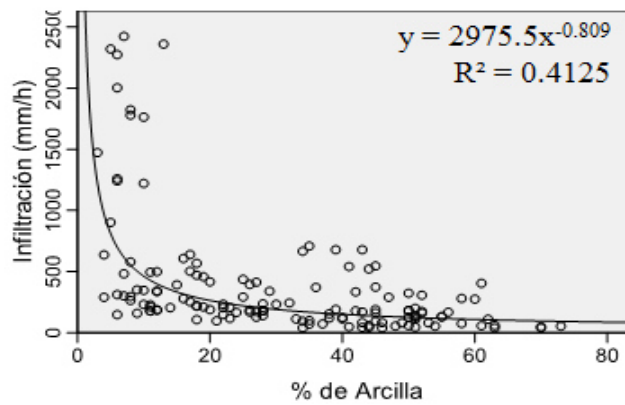


Figura 5. 16. Análisis de regresión para la arcilla de los suelos con la infiltración. N=140.

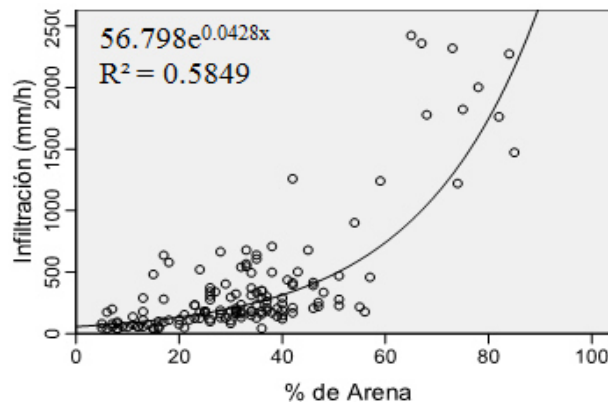


Figura 5. 17. Análisis de regresión para la arena de los suelos con la infiltración. N= 140.

5.5.1. Potencial de infiltración de los suelos

En las pruebas de kruskal wallis, para los datos de la infiltración agrupados dentro de los diferentes tipos de suelo se encontraron diferencias significativas (Sig. <0.001) generando 5 grupos con diferentes potenciales de infiltración. Estos grupos se presentan listados alfabéticamente de manera ascendente en la figura 5.18 y se representan en el mapa de los tipos de suelo del área de estudio en la figura 5.19.

Para los datos de la infiltración agrupados dentro de los diferentes usos de suelo se también encontraron diferencias significativas (Sig. <0.001) y se generaron 3 grupos con diferentes potenciales de infiltración. Estos grupos se presentan listados alfabéticamente de manera ascendente en la figura 5.20 y se representan en el mapa de los usos de suelo del área de estudio en la figura 5.21.

El potencial de infiltración del área de estudio se grafica mediante la elaboración de un clúster de los datos de infiltración tomando en cuenta las combinaciones de las variables uso y tipo de suelo (figura 5.22), en el análisis clúster se generaron 5 grupos en donde en grupo uno, representa a las combinaciones de uso y tipo de suelo con mayor potencial de infiltración, hasta llegar al grupo cinco, en donde se obtuvieron las menores tasas de infiltración. Los tipos y usos de suelo evaluados se presentan abreviados de la siguiente forma: Feozem=Fz, Fluvisol=Fv, Litosol=Lt, Luvisol=Lv, Regosol=Rg, Rendzina=Rz, Vertisol=Vt, Xerosol=Xe, Agrícola=Agri, Forestal=Fore, Ganadero=Gan, Rural=Rur y Urbano=Urb.

Además de esto, se generó un mapa donde se combinaron (mediante sobre posición) los grupos de diferente potencial de infiltración generados en las pruebas de Kruskal -wallis para los tipos y usos de suelo. En este mapa se observan zonas con distinto potencial de infiltración para el área de estudio (figura 5.23).

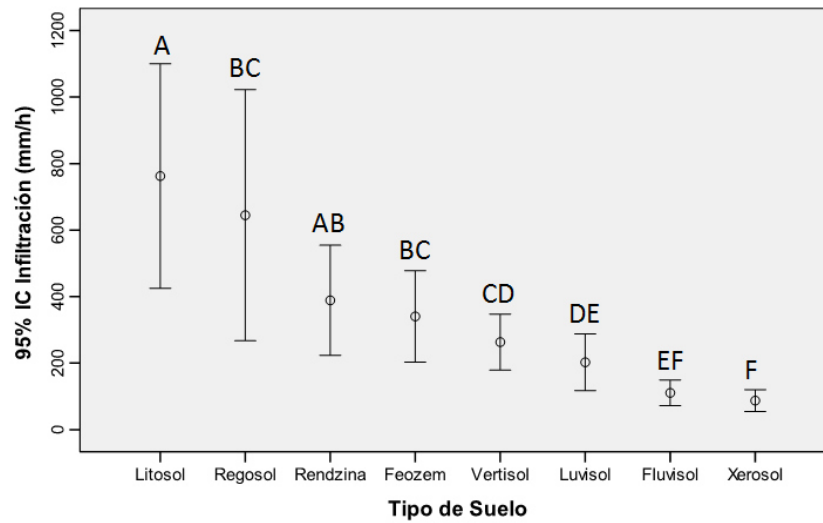


Figura 5. 18. Gráfico de error para los datos de campo correspondientes a la variable infiltración (mm/h) en diferentes tipos de suelo. Se muestran las agrupaciones obtenidas mediante el análisis de Kruskal-Wallis con letras de la “A” a la “F”. N=140.

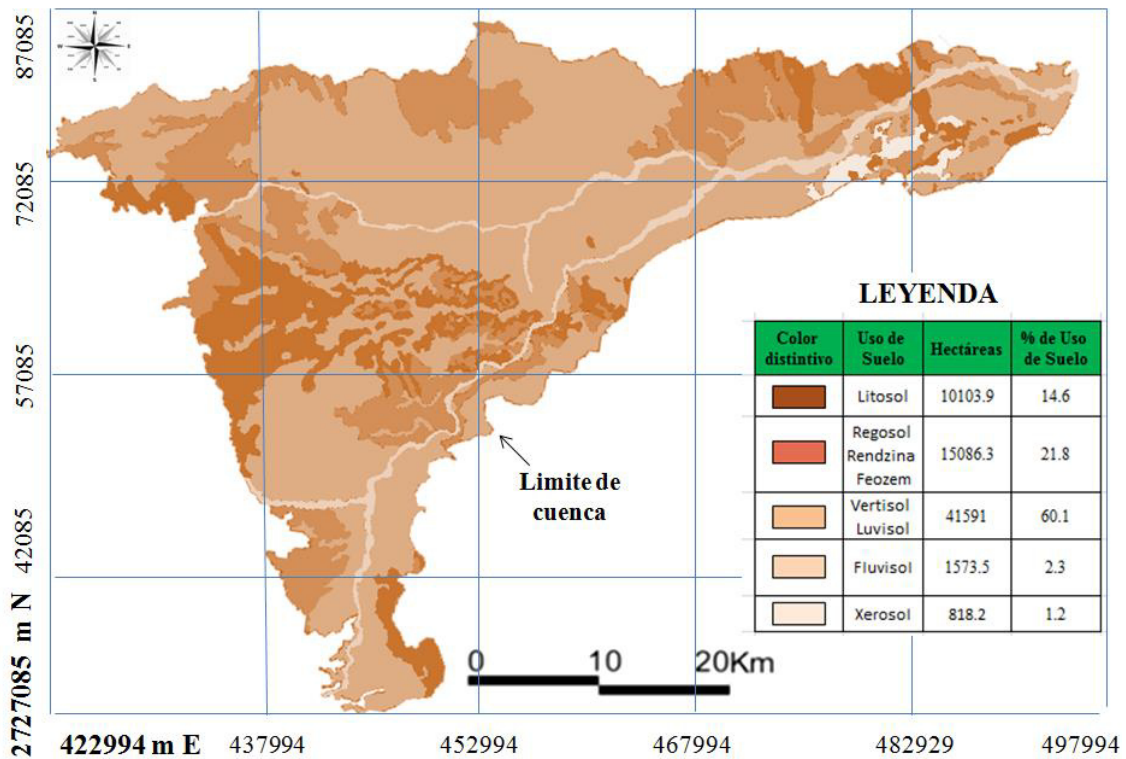


Figura 5.19. Mapa de los grupos generados en la prueba de Kruskal-wallis para la variable infiltración en diferentes tipos de suelo, las tonalidades más oscuras indican mayor potencial de infiltración.

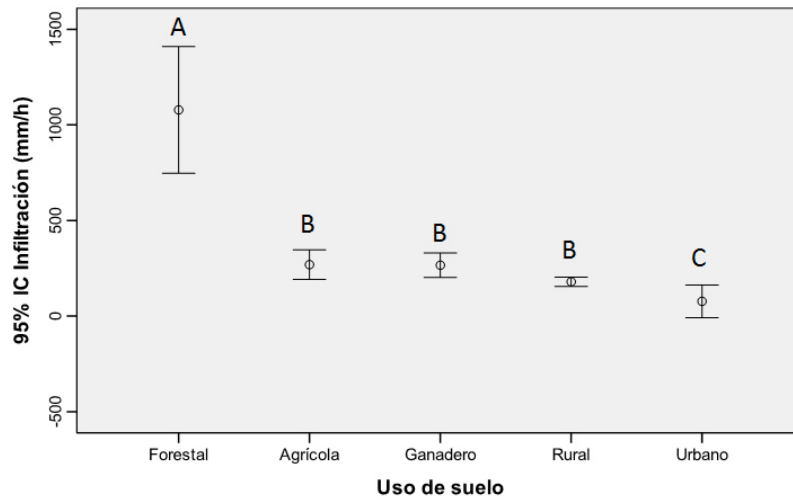


Figura 5.20. Gráfico de error para los datos de campo correspondientes a la variable infiltración (mm/h) en diferentes usos de suelo. Se muestran las agrupaciones obtenidas mediante el análisis de Kruskal-Wallis con letras de la “A” a la “C”. N=140.

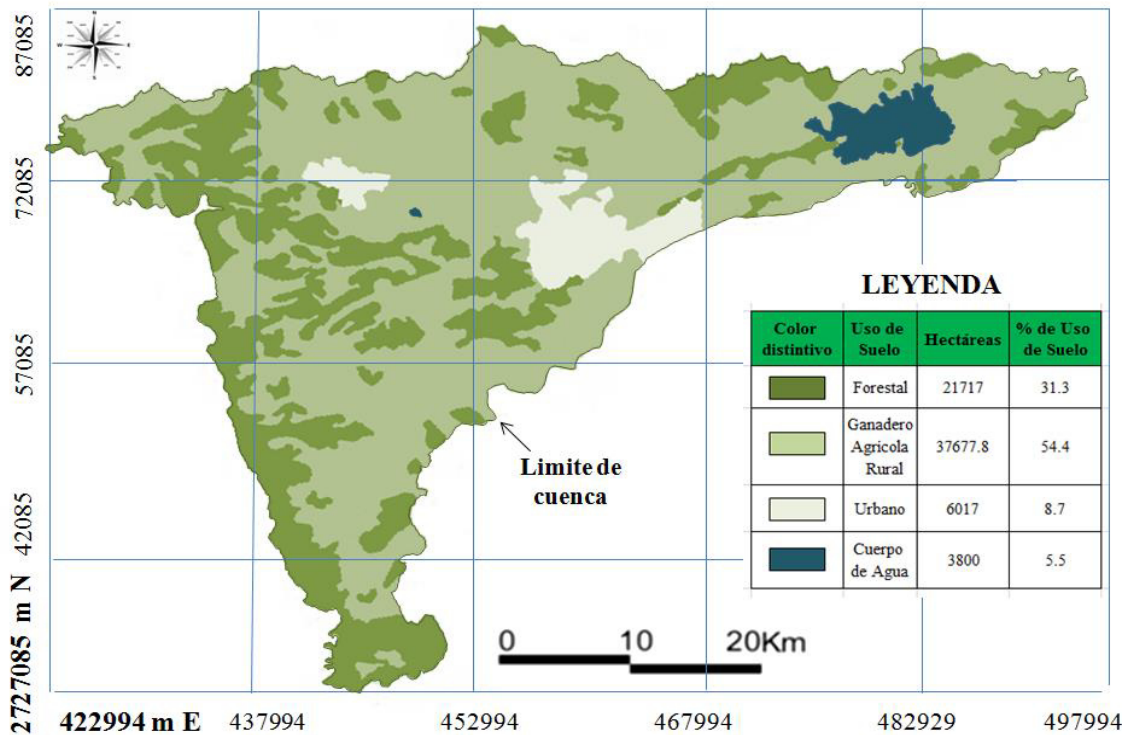


Figura 5.21. Mapa de los grupos generados en la prueba de Kruskal-wallis para la variable infiltración en diferentes usos de suelo, las tonalidades más oscuras indican mayor potencial de infiltración (INEGI, 2005).

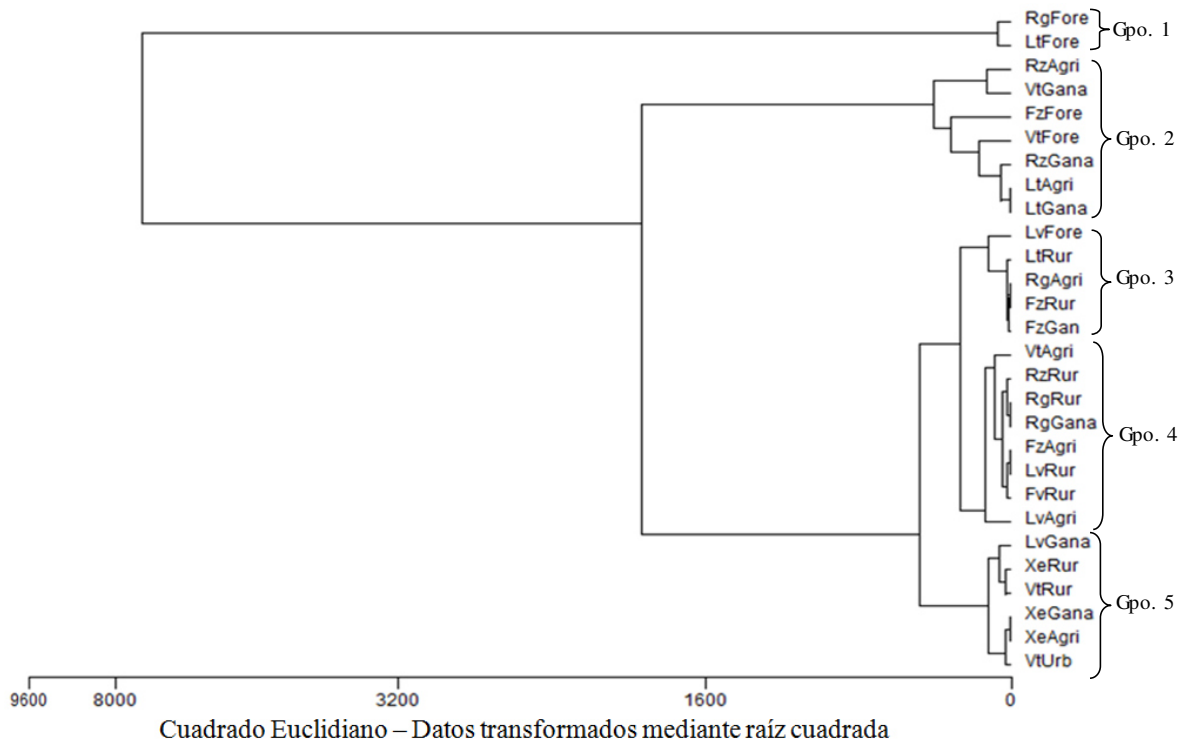


Figura 5. 22. Cluster de la infiltrción en diferentes tipos y usos de suelo.

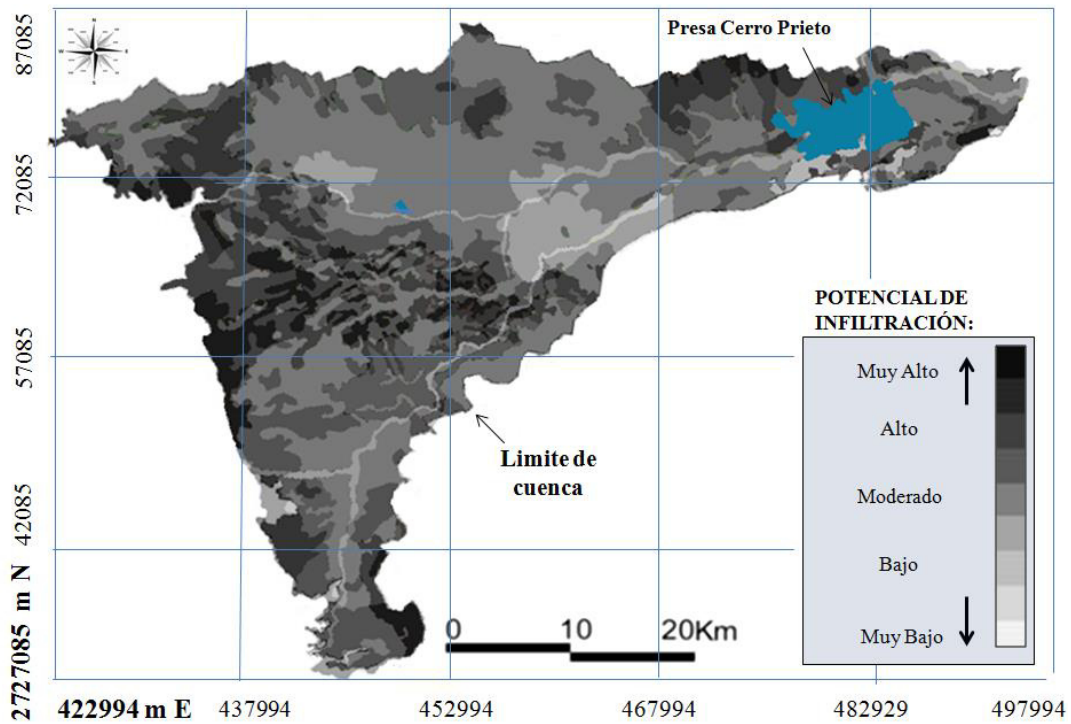


Figura 5. 23. Potencial de infiltración en el área de estudio.

CAPÍTULO VI

DISCUSIÓN

6.1. Discusión

La cuantificación de la tasa de infiltración del agua en el suelo es de gran interés para el diseño eficiente de sistemas de riego, y en estudios medioambientales y edáficos relacionados con la determinación de la erosión del suelo (Lizarraga *et al.*, 2002).

Los resultados de esta investigación indican que los tipos de suelo presentan diferentes tasas de infiltración así como diferencias en su granulometría, siendo los suelos más arenosos, aquellos que presentan mayores tasas de infiltración. Hoyos y colaboradores (2000), encontraron que la infiltración de agua en los suelos de sabana de la altillanura colombiana está estrechamente asociada con la textura ya que obtuvieron correlaciones lineales significativas ($P < 0.0001$) y en forma positiva con el porcentaje de arena ($R = 0.63$), y en forma negativa con el porcentaje de limo ($R = -0.59$), porcentaje de arcilla. Además de encontrar a la infiltración exponencialmente ajustada ($R = 0.92$) con el porcentaje de arena.

Por otra parte las actividades humanas, como la ganadería, la agricultura y los asentamientos urbanos y rurales, modifican las propiedades físicas de los suelos tales como el aumento de la compactación, la densidad de los suelos y la pérdida de cobertura vegetal, y ocasionan una disminución del potencial de infiltración de estos. Para este estudio la propiedad que mayor incidencia presentó en la infiltración fue la densidad, observándose una correlación inversa. Este comportamiento confirma que a mayor densidad del suelo, la velocidad de infiltración disminuye.

Además de verse afectada por los usos y tipos de suelo, la infiltración también es la propiedad del suelo más afectada por la posición geomorfológica. Pinzón y Amezcuita, (1991) en un estudio realizado en el pie de monte amazónico en Colombia, obtuvieron tasas de infiltración mayores en el bosque, comparadas con las obtenidas en el lomerío y en terraza

baja. De igual forma, los suelos que presentan mayores pendientes favorecen los escurrimientos superficiales y esto disminuye su infiltración (Rivera, 1991).

Los valores de las tasas de infiltración presentaron muy alta variabilidad con una media de 374.18 mm/h. Comparado con otras investigaciones estos valores son significativamente altos. Esto puede ser debido a que en el área de estudio las pruebas de infiltración se hicieron en temporada seca con un porcentaje de humedad inferior al 23%. Además de que el área de estudio pertenece a una región semiárida sub-tropical muy extremosa con climas semi-cálidos, sub-húmedos y secos (Návar y Synnott, 2000).

Hoyos y colaboradores (2000), encontraron y describieron infiltraciones moderadamente rápidas (109 mm/hora) en la altillanura ondulada Colombiana, mientras la Altillanura plana encontraron infiltraciones moderadas (60 y 51 mm/hora respectivamente). En Las sabanas bajas, a su vez encontraron mayor infiltración (86.5 mm/hora) que las sabanas altas, pasturas tradicionales y pasturas asociadas con cultivos con valores similares (58.5, 50 y 48 mm/hora respectivamente). En otra investigación realizada en un ecosistema tropical lluvioso en el pie de monte amazónico de Colombia, Pinzón y Amezquita, (1991) encontraron valores de infiltración de 70 mm/hora en el bosque mientras que en el lomerío y terraza baja la infiltración fue muy lenta, menor de 8 mm/hora. En un estudio realizado en el municipio de Miranda del Norte en Brasil en un lote de una hectárea cultivado con maíz, Da Silva y colaboradores (2010) obtuvieron que la infiltración presento valores entre de 3 y 90 y con una media de 36.03 mm/hora.

Diamond y Shanley, hacen mención a la variabilidad temporal de la capacidad de infiltración en los suelos la cual aumenta o disminuye con el paso de los días, y es significativamente diferente en el transcurso de las estaciones del año para un mismo suelo. Siendo para los suelos de Irlanda 3.5 veces mayor la capacidad de infiltración en verano en comparación a la de invierno. Es por ello que para la presente investigación las pruebas de infiltración se realizaron solamente en temporada seca.

El hecho de percibir una alta variabilidad en el parámetro infiltración, también es indicio que en varios sitios el suelo no llegó a una condición cercana a la saturación, especialmente, aquellos donde la tasa de infiltración fue alta. Sin duda, esta variabilidad es definida por la heterogeneidad de las propiedades físicas y la complejidad que relacionan los diferentes atributos hidrofísicos, entre los que se puede destacar el tamaño y la forma de los agregados, la continuidad y la forma de los poros, así como la presencia y la distribución de raíces (Imhoff *et al.* 2010). Dadas las características físicas de la zona de estudio, la alternativa más eficiente sugerida es aumentar los tiempos de prueba de infiltración, si estas se realizan en época seca, para que el suelo se acerque a la saturación, lo que, posiblemente, puede conllevar a una disminución en la variabilidad de la infiltración básica. (Orjuela y colaboradores, 2010).

Los resultados del presente estudio complementan a los obtenidos en la investigación de Moctezuma, (2011), en la cual, mediante métodos indirectos, se obtuvo que para el área de estudio perteneciente a la cuenca del Río Pablillo, los resultados del balance de cloruros muestran que la recarga directa posee un patrón de distribución en forma de bandas que corresponde con las isoyetas regionales. Adicionalmente este patrón está influenciado por la distribución de las permeabilidades de los materiales geológicos de la zona no saturada.

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

Con base a la integración de los resultados de las metodologías aplicadas en los análisis en campo y laboratorio, así como las observaciones realizadas (presencia de árboles, arbustos, matorral, pastizal, labranza, desmonte y pendiente), se concluye que, en la parte baja de la cuenca del Río Pablillo (correspondiente al área de estudio) se encuentran presentes ocho tipos de suelo (feozem, fluvisol, litosol, luvisol, regosol, rendzina, vertisol y xerosol) y cinco usos (agrícola, ganadero, rural, forestal y urbano), en los cuales se encontraron diferencias estadísticamente significativas para las tasas de infiltración, densidad, y granulometría de cada sitio.

Dentro de los análisis de los tipos de suelo evaluados, los que presentaron tasas de infiltración significativas mayores fueron los correspondientes al tipo litosol, mientras que los fluvisoles y xerosoles presentaron tasas significativas menores. Con respecto al uso de suelo evaluado, el uso forestal corresponde a tasas de infiltración significativamente mayores, mientras que el uso de suelo urbano corresponde a tasas significativas menores.

Por otro lado, se observa que las tasas de infiltración del agua en el suelo presentan una correlación negativa con el contenido de arcilla ($R = -0.64$, $P < 0.01$) y densidad del suelo ($R = -0.86$, $P < 0.01$), además de una correlación positiva con el contenido de arena ($R = 0.66$, $P < 0.01$) y la presencia de árboles en el terreno ($R = 0.39$, $P = 0.04$). Cabe señalar que la variable humedad estuvo controlada (debido a que se procuró realizar los muestreos en campo en temporadas que no influyeran en gran medida las lluvias, con la finalidad de minimizar el error en la información) de modo que no influyó en los resultados.

Adicionalmente, se observó que el uso de suelo influye en las variables densidad, presencia de árboles, mientras que el tipo de suelo influye en la granulometría, se concluye que ambos son determinantes en el proceso de infiltración en la zona superficial del suelo.

En el caso particular del análisis clúster referente a la variable infiltración, se concluye que, las combinaciones de las variables tipo y uso de suelo presentan tasas de infiltración significativamente mayores fueron el regosol-forestal y litosol-forestal, mientras que las combinaciones de luvisol-ganadero, xerosol-rural, vertisol-rural, xerosol-ganadero, xerosol-agrícola y vertisol-urbano presentan tasas de infiltración significativamente menores.

7.2 Recomendaciones

Con el fin de mejorar las estimaciones de la infiltración de agua en distintos usos y tipos de suelo en la región se recomienda una serie de acciones que incluyen:

- Incrementar el número de sitios para el análisis de la infiltración, sobre todo en la parte alta de la cuenca.
- Aplicar métodos directos (mediante el empleo de infiltrómetros de doble anillo) para la estimación de la infiltración en diversas cuencas, con la finalidad de tener información uniforme a cerca de las tasas de infiltraciones.
- Analizar periódicamente mediante un sistema de información geográfica los cambios en el uso de suelo, con la finalidad de reconocer y delimitar el crecimiento de la mancha urbana, desmontes, etc.
- Realizar propuestas de reubicación de proyectos referentes a las futuras instalaciones de industrias, que utilicen y/o pudieran tener accidentes de derrames de contaminantes en zonas con altas tasas de infiltración, con la finalidad de evitar contaminar el subsuelo, así como el agua subterránea.
- Utilizar estos estudios para la toma de decisiones en las construcciones de obras civiles (fraccionamientos, represas, etc.).

VIII. BIBLIOGRAFÍA

8.1 Bibliografía

- Acuña E. (2009) 11. Pruebas No Paramétricas. Universidad de Puerto Rico. Reciento Universitario de Mayaguez. 22 p. <http://academic.uprm.edu/eacuna/minimanlsl.pdf>
A 21 Mayo de 2014.
- Agricultura ecológica (2013) El suelo como fuente de vida, propiedades (II). Construnatura. Artículo, Agricultura ecológica; <http://www.construnatura.com/esp/articulo/0/el-suelo-como-fuente-de-vida--propiedades--ii->. A 26 Julio de 2014.
- Alderfer R. B., and Robinson (1947) Runoff from Pastures in Relation to Grazing Intensity and Soil Compactation. Amer. Soc. Agron. J., 29: 948-958.
- Allison, G.B., Cook, P.G., Barnett, S.R., Walker, G.R., Jolly, I.D., Hughes, M.W. (1990) Land clearance and river salinisation in the western Murray Basin, Australia. *Journal of Hydrology.*, 119: 1-20.
- Amézketa L. E., Gazol L. R. y Aragüés L. R. (2002) Desarrollo de un infiltrómetro automático y su aplicación en campo. *Investigación Agrícola de Producción para la Protección de la Vegetación.*, 17: (1) 132.
- Anderson, M. G. and Burt T. P. (1990) Subsurface runoff. In: *Process Studies in Hillslope Hydrology*. M.G. Anderson and T.P. Burt (eds.). John Wiley & Sons, pp. 365-400.
- Angulo-Jaramillo R., Vandervaere J.P., Roulier S., Thony J.L., Gaudet J.P. and Vaucelin M., (2000) Field measurements of soil surface hydraulic properties by disc and ring infiltrometers. A review and recent developments. *Soil & Till. Res.*, 55, pp. 1-29.
- Anuraga T. S. K., Ruiz L., Mohan Kumar M.S., Sekhar M. y Leijnse A. (2006) Estimating groundwater recharge using land use and soil data: A case study in South India. *Agric. Water Manag.*, 84: 65-75.
- Arce, C. A. (2014) Determinación de la velocidad de infiltración a través de método de infiltrómetro de doble cilindro y del cilindro de porchet. *Manejo de Agua de Riego*. Universidad de San Carlos de Guatemala. Centro Universitario del Norte. Técnico en Producción Agrícola. Practica No. 3.

- Arriaza G. A. J., Fernández P. F., López S. M. A., Muñoz M. M., Pérez P. S. y Sánchez N. A. (2008) Estadística Básica con R y R-Commander. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cádiz. pp. 1 - 111.
- ASTM (2007) Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils¹. Designation: D422. American Section of the International Association for Testing Materials. p. 8.
- Ayuga T. E. (2008) Análisis de Conglomerados. Análisis Multivariante. Power Point en pdf. pp. 1-72.
- Azooz R. H., and Arshad M.A. (1996) Infiltration and Hidraulic Conductivity Under Long-term no-tillage and Conventional Tillage System. Canadian Jornal of Soil Science., 76:143-152.
- Badii, M.H., Castillo J., Cortez K., Wong A. & Villalpando P. (2007) Análisis de correlación canónica (ACC) e investigación científica. Innovaciones de Negocios 4(2): ISSN 1665-9627.UANL, San Nicolás, N.L., México. pp. 405 - 422.
- Beven, K. y P. Germann. (1982) Macropores and water flow in soils. Water Resour. Res., 18: 1311-1325.
- Bergkamp G. (1998) A Hierarchical View of the Interactions of Runoff and Infiltration With Vegetation and Micro topography in Semiarid Shrub Lands. Catena., 33: 201-299.
- Blackburn W. H. (1975) Factors Influencing Infiltration and Sediment Production of Semiarid Rangelands in Nevada. Water Resour. Res., 11: 929-937.
- Blackburn W. H., Wood J. C. and De Haven M. G. (1986) Storm Flow and Sediment Losses From Site-Prepared Forestland in East Texas. Water Resour., 22: 776-778.
- Blackburn W. H., Knight R. W. and Wood. M.K. (1982) Impact of Grazing on Watersheds: a State of Knowledge. Texas Egr. Exp. Sta. Pub. 1496 p.
- Belén C. M., Cabrera F. A. y Navarro Y. (2010) Procesamiento de datos y análisis estadísticos utilizando SPSS. Un libro practico para investigadores y administradores educativos. Pontificia Universidad de Católica do Rio Grande do Sul. Brasil. pp. 1 - 15.
- Bouwer, H. (2002) Integrated water management for the 21st century: problems and solutions. J. Irri. Dra. Eng. ASCE., 128: 193-202.

- Branson F. A., Miller R. F., and Mc Queen J. S. (1962) Effects of Contour Furrowing, Grazing Intensities and Soils on Infiltration Rates, Soil Moisture and Vegetation near Ft. Peck, Mont. *Jornal of Range Manag.*, 15:151-158.
- Camacho E. *et al.*, (1997) Modelo de manejo y control en tiempo real del riego por surcos. Departamento de Agronomía. Universidad de Córdoba. Volumen 4, Numero. 4. p. 11. <https://upcommons.upc.edu/revistes/bitstream/2099/3079/1/44article1.pdf> A 02 de Noviembre de 2013.
- Cisneros A. R. (2003) Apuntes de la materia de riego y drenaje. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Facultad de Ingeniería. Centro de Investigación y Estudios de Posgrado y Área Agrogeodésica. 164 p.
- Clothier, B. E., y White. I. (1981) *Measurement of sorptivity and soil water diffusivity in the field*. *Soil Science Society of America Journal.*, 45: 241 – 245.
- Copeland O. L. (1963) Land Use and Ecological factors in Relation to Sediment Yields. In: *Proc., Fed. Intergagency Sedimentation Conf., USDA. Misc. Pub., 980: 72-84.*
- Cuadras C. M. (2014) Nuevos Métodos de Análisis Multivariante CMC. Editions Barcelona. pp. 63 - 76.
- Custodio E. y Llamas M. R. (1976) Hidrología subterránea. Tomo I. Ed. Omega, S. A. Barcelona, España. pp. 87-88.
- Custodio E. y Llamas M. (1983) “Hidrología Subterránea”. Ediciones Omega. Barcelona. (España). 23 p.
- Chávarri V. E. A. (2004) Infiltración; Curso IA-4026 Hidrología Aplicada, Clase VIII, Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad Nacional Agraria La Molina. 11 p.
- Da Silva M. A. L., E. de M. Gomes., J. H. T. Camacho (2010). Variabilidad Espacial de la Infiltración y su Relación con Algunas Propiedades Físicas Ingeniería e Investigación., 30: (2) 116-123.
- De León Gómez H. (1989) Aspectos hidrológicos generales de la cuenca del Río Pablillo, Linares, N. L., México. Primer Simposio Regional. Avances y Perspectivas de la Investigación de Recursos Abióticos del Noreste de México: Agua, Clima, Suelo y Geología. Universidad Autónoma de Tamaulipas, Cd. Victoria, Tamaulipas, 2- 4 de Abril de 1990.

- Dee R.F., Box T.W. and Robertson J.E. (1996) Influence of Grass Vegetation on Water Intake of Pullman Silty Clay Loam. *Jurnal of Range Manag.*, 19: 77-79.
- Deming J. W. (2002) Relationships between microbial extracellular enzymatic activity and suspended and sinking particulate organic matter: Seasonal transformations in the North Water. *Deep-Sea Res. II.*, 49: 5211-5225. doi: 10.1016/S0967 - 0645 (02) 00186-8.
- Díaz D. C., Esteller A. M. V., López V. F. (2005) Recursos Hídricos. Conceptos básicos y estudios de caso en Iberoamericana. Montevideo/Toluca Piriguazú ediciones/ CIRA-UAEM, (ISBN Piriguazú: 9974-7571-6-9) 2005, pp. 88 - 200.
- Donald G. y Lobo D. (2011) Métodos para determinar granulometría y densidad aparente del suelo. Universidad de Gante, Bélgica; Facultad de Agronomía. 45 p.
- Douglas J. E. (1975) Southeast Forest and the Problem of Non-point Sources of Water Pollution, In: P. M. Ashton and R. C. Underwood (eds.), *Proc. Southeastern Regional Conf. Virginia Water resour. Res. Center, Blacksburg, V.* pp. 29-44.
- Espinoza, C. C. (2004) Existencia y origen de las aguas subterráneas; CI51J Hidráulica de Aguas Subterráneas y Su Aprovechamiento. Universidad de Chile. 3 p.
- FAO (1993) El estado mundial de la agricultura y la alimentación, 1993. FAO, Roma (Italia), Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Colección FAO: Agricultura N° 26. ISBN 92-5-303360-6. pp. 230-243.
- FAO (2007) Evaluación exhaustiva del manejo del Agua en Agricultura. Agua para la Alimentación, Agua para la Vida. Londres: Earthscan y Colombo: Instituto Internacional del Manejo del Agua. ISBN 978-92-5-306020-7. 47 p.
- FAO (2011) El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para a alimentación y a agricultura. Como gestionar los sistemas en peligro, Valle de Terme en Caracalla, 00153. Roma (Italia). 47 p.
- FAO (2013) Afrontar la escasez de agua Un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria, ISBN: 978-92-5-307304-7. 78 p.
- Flores, L. J. S. (1997) Evaluación de la Calidad del Agua del Río San Juan, en el Estado de Nuevo León. Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias Forestales, U.A.N.L., 127 p.

- Florentino A. (2011) Métodos para medir el contenido de agua en el suelo. Instituto de Edafología, Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela, Maracay, estado Aragua, Venezuela. pp. 48 - 70.
- Forysthe W. (1975) "Física de los suelos", Manual de laboratorio, Instituto interamericano de ciencias agrícolas, San José, Costa Rica, pp. 1-47.
- Fuente F. S. (2011) Análisis conglomerados. Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales. Universidad Autónoma de Madrid. pdf. pp. 1 - 57.
- Frerichs R. R., D. V. M., y H. P. D. (2008) Manual de Entrenamiento de Software (Análisis Estadístico de Encuestas Rápidas por Conglomerados). Departamento de Epidemiología Universidad de California, Los Ángeles (UCLA). pp. 1 - 11.
- Galván-Mancilla S. M. (1996) Cartografía hidrológica de la terraza baja entre Hualahuises y Linares, N.L. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias de la Tierra, U.A.N.L., 63 p.
- García E. (1973) Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). 3a. Edición, Instituto de Geografía, UNAM, México, D.F., 252 p.
- García H. M. A., García H. M. M. A., Castellanos V. I., Cano S. Z. y Peláez R. C. M. (2008) Variación de la velocidad de infiltración media en seis ecosistemas inalterados. *Terra Latinoamericana.*, 26: 21-26.
- García H. J. y Jurado E. (2008) Caracterización del matorral con condiciones prístinas en Linares N.L., México. Artículo científico en *Ra Ximhal.*, 4: 21 p.
- García V. J. A. (2011) Diseño e instalación de un sistema de riego por aspersión automatizado en el Gran Bosque Urbano, Saltillo, Coahuila, México. UAAAN. Tesis de Licenciatura. 77 p.
- Geissert K. D., Gómez T. Ch. A., Gómez T. R. A. y Guevara S. M. M. (2012) Funciones ecohidrológicas del suelo y su importancia para la conservación y el desarrollo. *CONABIO. Biodiversitas.*, 105: 10-12.
- Gifford, G. F., and Hawkins. R. H. (1978) Hydrologic Impact of Grazing on Infiltration: a Critical review. *Water Resour. Res.*, 14: 304-313.

- Gobierno del Estado de Nuevo León (2005) Esquema carretero;
http://www.nl.gob.mx/pics/pages/carreteras_nuevoleon_base/mapa_carretero_2005.pdf; A 01 de Mayo de 2014.
- González M. C. A. (2011) Unidad 2. Contenido de Humedad del Agua en el Suelo. Relación Agua, Suelo, Planta, Atmosfera (R.A.S.P.A), Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. 7 p.
- Gurovich L., (1985) Fundamentos y diseño de sistema de riego, Instituto Interamericano de cooperación para la agricultura (CIIA). Primera Edición, San José, Costa Rica. pp. 1-5.
- Guzmán A. A. A. (2013) Manual operativo del aparato de globo de hule ASTM D 2167, Análisis comparativo y descriptivo con el método del cono de arena ASTM D 1556 para la determinación de la densidad de campo. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Civil. Trabajo de Graduación de Ingeniería. 41 p.
- Heras R. (1970) “Manual de Hidrología”. Centro de Estudios Hidrográficos. Madrid. 12 p.
- Hernández G. S.^{*1} y Cuevas A. J. H.^{**2} (2013) Programas informáticos de uso libre y su aplicación en la enseñanza de la estadística. Education ISSUES / Aspectos educacionales. Revista investigación operacional. ^{*1} Universidad Veracruzana e ^{**2} Instituto Tecnológico de Chihuahua II., 34: 166 - 174.
- Hoyos P., E. Amézquita, R. J. Thomas, R. R. Vera, D. L. Molina, E. F. Almanza (2000). Relaciones Entre La Infiltracion De Agua En El Suelo Y Algunas Propiedades Fisicas En Las Sabanas De La Altillanura Colombiana. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) 142 p.
- Hurtado M. E. (2012) Estadística I, Enrique A. Hurtado. Contenido Modular. Cali-Colombia. 228 p. <http://www.gestiopolis1.com/recursos7/Docs/fin/estadistica-descriptiva.pdf> A 04 Julio de 2014.
- Ibañez A. S., Moreno R. H. y Blanquer J. M. (2009) Características del infitrómetro de doble anillo (anillos de Munz). Producción Vegetal. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Universidad Politécnica de Valencia. p. 10.

- Imhoff, S.; Ghiberto, P.J.; Grioni, A.G.; Gay, J.P. (2010). Porosity characterization of Argiudolls under different management systems in the Argentine Flat Pampa. *Geoderma.*, 158 (3-4): 268-274.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática) (1981) Síntesis Geográfica del Estado de Nuevo León, México, D.F., pp.170-190.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática) (1983) Carta hidrológica de Aguas Superficiales (Linares G14-11). Escala 1:250,000.
- INEGI. Conjunto de Datos Vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación Serie III. Marco Geoestadístico Municipal 2005, versión 3.1.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática) (2010) Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. Página web <http://cuentame.inegi.gob.mx/monografias/informacion/nl/poblacion/default.aspx?tema=me&e=19> A 12 de Mayo de 2014.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática) (1981) Síntesis Geográfica del Estado de Nuevo León, México, D.F., pp. 170-190.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática) (2004) Guías para la Interpretación de Cartografía Edafológica, INEGI. México. pp. 11- 24.
- IUSS (Base Referencial Mundial de la Unión Internacional de Ciencias del Suelo) Grupo de Trabajo WRB (Base Referencial Mundial del Recurso Suelo) (2006) Base Referencial Mundial del Recurso Suelo, Un marco conceptual para clasificación, correlación y comunicación internacional. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. ISSN 1020-430X. Segunda edición 2006, Primera Actualización 2007. ISRIC, FAO, Roma., 117 p.
- Jara J. y Valenzuela A., (2002) El agua en el suelo, Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción. 613 p.
- Jaramillo J. D. F. (2002) Introducción a la Ciencia del Suelo, Facultad de Ciencias Medellín, Universidad Nacional de Colombia. pp. 129 - 136.
- Jardine N. and Sibson R. (1968) The construction of hierarchic and non-hierarchic classifications. King's College, Cambridge, England. pp. 177-184.

- Kimmins J. P. (2003) "Ordenamiento del ecosistema forestal: una necesidad del medio ambiente. pero se trata de una realidad practica o simplemente de un ideal ecotópico". XII congreso forestal mundial. Disponible en: http://www.fao.org/DOCREP/ARTICLE/WFC/XII/MS_18_-_S_.HTM. A 25 Agosto de 2014.
- Knoll G., and Hopkins H. H. (1959) The Effect of Grazing and Trampling Upon Certain Soil Properties. Trans. Kansas Acad. Sci., 62: 221-231.
- Kuiper, F. K. and Fisher, L. (1975) A Monte Carlo comparison of six clustering procedures. Biometrics., 31: 777-783.
- Landini A. M., Martínez D., Días H., Soza E. Agnes D. and Sainato C. (2007) Modelos de infiltración y funciones de pedotransferencia aplicados a suelos de distinta textura. Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. 130 p.
- Lance, G. N. and Williams, W. T. (1967) «A general theory of classificatory sorting strategies. I. Hierarchical systems». Computer J., 9: 373-380.
- Lejarza y Lejarza, (2014) Contrastes no paramétricos; <http://www.uv.es/ceaces/pdf/mopara.pdf>; A 28 de Marzo de 2014. 3 p.
- Lima, C. A. G. and Silans, A. P (1999). Variabilidade espacial da infiltração de água no solo. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília., 34: 11-20.
- Lizarraga E. A., Gazol L. R. y Aragues L. R. (2002). Desarrollo de un Infiltrómetro Automático y su Aplicación en Campo. Investigación agraria. Producción y protección vegetales., 17: 131-142.
- Lizárraga-Mendiola L., De León Gómez H., Medina-Barrera F. y Návar-Chaidez J. (2004) Evaluation of the impacted aquifer by the landfill of Linares, Mexico. Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, (publicado).
- López Ramos, E. (1980) Geología de México; tomo II: México, D.F., Instituto de Geología de la U.N.A.M., Ed. Escobar, 454 p.
- López R. P. y Fachelli S. (2013) Técnicas multivariadas aplicadas al análisis de la realidad social. Universidad Autónoma de Barcelona. Departamento de Sociología. pp. 1 - 8.

- Lucendo M. A. L. (2007) Análisis Clusters. Curso Técnicas Multivariantes. Máster en Ordenación y Gestión del Desarrollo Territorial y Local. Módulo I. <http://www.geografía.us.es/> pp. 1 - 40. A 02 Agosto de 2014.
- Luis (2008) Instrucciones para realizar un Canoco. http://softpicks.com.es/software/Audio-Video/CAD/MVSP_es-196070.htm pp. 1 y 2. A 25 Agosto de 2014.
- Machiwal, D., Jonathan M. K. and Maildin, B. C. (2006) Modelling Infiltration and quantifying spatial soil variability in a Wasteland of Kharagpur, India. *Biosystems Engineering, United Kingdon.*, 95: (4) 569-82.
- Maderey R. L. E. y Jiménez R. A. (2005) Principios de Hidrogeografía. Estudio del Ciclo Hidrológico. Instituto de Geografía Universidad Nacional Autónoma de México. Serie Textos Universitarios., 1: 57 p.
- Mansour S. A., Pazira E. and Dadgar M. (2010) Studying the Philip model capability to estimate water infiltration parameters. *World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World. Brisbane, Australia.* pp. 22-24.
- Martínez A. P. A., Pando F. V., Del Río S. J. J., Navarro H. J. (2006) Aproximación al conocimiento de la infiltración a través del análisis dimensional. Artículo publicado en la revista *Ecología*, N° 20. pp. 471-491.
- Mendoza S. I. (2012) Catálogo de Software Académico. Gestión de la Información e Innovación Tecnológica - GIIT. Universidad del Pacifico. Chile. 2 p.
- Moctezuma N. K. M. (2011). Estimación de la magnitud y distribución de la recarga directa de a región de Linares, Nuevo León mediante el método de balance de cloruros. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL. 146 p.
- Moehring D. M., and Rawls I. W. (1970) Detrimental Effects of Wet Weather Logging. *J. Forest.*, 68: 166-167.
- Molinero L. M. (2003) Bondad de ajuste a una normal. Transformaciones. Pruebas no paramétricas. *Alce Ingeniería. Asociación de la Sociedad Española de Hipertensión.* p. 6. www.seh-lelha.org/stat1.htm. A 07 de Agosto de 2013.
- Morell I. y Hernández F. (2000) El agua en Castellón. Un reto para el siglo XXI. Publicacions de la Universitat Jaume I. ed, III. ISBN 84-8021-333-7. 24 p.

- Moreno Esparza L. (2009) Vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación en la región de Linares, Mediante el Método DRASTIC. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL. pp. 3-103.
- Muñoz C. R. (2004) Field devices for monitoring soil water content. University of Florida, IFAS Extension Bulletin 343, Florida, USA, 16 p.
- Návar J. y Synnott T. J. (2000a) Soil infiltration and land use in Linares, N.L., Mexico. *Terra.*, 18: (3) 255-262.
- Návar J. y Synnott T. J. (2000b) Surface runoff, soil erosion, and land use in Northeastern Mexico. *Terra.*, 18: (3) 247-253.
- Osborn B. (1954) Soil Splash by Reindrop Impact on Bare Soils. *J. Soils and Water Conser.*, 9: 33-38.
- Osoimehin B. (2011) Estado de la población mundial 2011. 7 Millones de personas su mundo, sus posibilidades. Informe de la División de Información y Relaciones Externas del UNFPA (Fondo de Población de las Naciones Unidas). New York, Estados Unidos de América. 124 p.
- Osuna C. E. S. (1996) Efecto de la lluvia sobre la rugosidad superficial e infiltración del agua en el suelo bajo dos sistemas de labranza. *Agricultura Técnica en México.*, Volumen. 22, Número. 1. pp. 3-17.
- Osuna C. E. S. y Padilla R. J. S. (1998) Estimación de la sorbilidad e infiltración usando datos de simulación de lluvia para tres tipos de suelos de la zona semiárida de México. Programa de Conservación de Suelo, Campo Experimental "Pabellón", CEPAB Aguascalientes, INIFAP. pp. 293-301.
- ONU (Organización de las Naciones Unidas), (2009) World Population Prospects: The 2008 Revision. Population Division of the Department of Economic and Social Affairs of the United Nations Secretariat, <http://esa.un.org/unpp>, Thursday, August 05, 2012; 4:13:44 P.M.
- ONU (Organización de las Naciones Unidas), (2013) Día Mundial de la Población, 11 de Julio. Tema 2013: El embarazo en la adolescencia., <http://www.un.org/es/events/populationday/>, A 05 de Febrero, 2014; 2:12 P.M.

- Orjuela M. H. M., Rubiano S. Y., Camacho T. J. H. (2010). Comportamiento de la Infiltración en un Oxisol. *Rev. U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 13 (2): 31-39
- Padilla y Sánchez, R.J., (1985) Las estructuras de la Curvatura de Monterrey, Estados de Coahuila, Nuevo León, Zacatecas y San Luis Potosí: *Revista del Instituto de Geología, U.N.A.M.*, 6: 1-20.
- Prado LL. L. M. (2009) Clasificación multicriterio aplicada a la caracterización de la maduración ósea en niños y adolescentes con oclusión normal y edades entre 9 y 16 años. UANL/Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Tesis Profesional de Maestría en Ciencias. pp. 47 - 48.
- Prieto G. R. E. (2006) Técnicas Estadísticas de Clasificación, Un Ejemplo de Análisis Cluster. Monografía Profesional de Ingeniería. Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Área Académica de Ingeniería. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. <http://www.uaeh.edu.mx/docencia/Tesis/icbi/licenciatura/documentos/Tecnicas%20estadisticas%20de%20clasificacion.pdf>. pp. 19 - 70. A 22 Junio de 2014.
- Pérez M. G. J. (2008) Uso de cilindros infiltrómetros de diferentes diámetro en la determinación de infiltración en el campo. Torreón Coahuila. Tesis Profesional, Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro" Unidad Laguna, 44 p.
- Pinzón A., E. Amezquita (1991). Compactación de Suelos por el Pisoteo de Animales en Pastoreo en el Piedemonte Amazonico de Colombia. *Pasturas Tropicales.*, 13: (2) 21-26.
- Reynaga O. J. (2011) Prueba de asociación de dos variables cuantitativas discretas (o dos continuas sin distribución normal). Prueba de Spearman. p. 28.
- Reynolds W. y D., Elrick D. E., (1990) Poned infiltration from a single ring: I. Analysis of steady flow. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54, pp. 1233-1241.
- Reynolds, D. V. (2012) Métodos De la Compactación Del Campo para los Suelos. PDHonline Course C167S (1 PDH). PDH Center. 3 p.
- Rivera N. M. F. (1991) Efecto del micro relieve sobre la infiltrabilidad de un pastizal del Rancho "Los Angeles". Buena Vista, Saltillo, Coahuila. Tesis Profesional, Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro". 61 p.

- Rodríguez V. A. F., Aristizábal C. A. M. y Camacho T. J. H. (2008) Variabilidad espacial de los modelos de infiltración de Philip y Kostiakov en un suelo Ándico. Universidad Nacional de Colombia. Eng. Agric. Joboticabal., 28: 64-75.
- Salas García J., Gárfias J., Llanos H., y Martel R. (2011) Modelo numérico 1D de la dinámica de infiltración en la zona no saturada, acuífero del valle de Toluca. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas., 28: 147-158.
- Sáez C. A. J. (2012) Métodos Estadísticos con R y R Commander. Departamento de Estadística e Investigación Operativa. Universidad de Jaén. España. pdf. pp. 1 - 142.
- Salgado L. (1999) Manual de estándares técnicos y económicos para obras de drenaje, Facultad de Ingeniería Agraria, Universidad de Concepción, Chile. 140 p.
- Salas CH. (2008) ¿Por qué comprar un programa estadístico si existe R?. School of Forestry and Environmental Studies, Yale University, USA. Departamento de Ciencias Forestales, Universidad de La Frontera, Temuco, Chile. Asociación Argentina de Ecología. 223 p.
- Sánchez B. C. (1984) Effects of livestock grazing and exclusion on infiltration rates and sediment yields for different range sites on El Plateado, Zacatecas, México, Ph. D. Dissertation. New Mexico State University. Las Cruces, New Mexico. U.S.A. 156 p.
- SEMARNAT (2006) Cruzada nacional por los bosques y el agua. V. Ecosistema Forestal. <http://cruzadabosquesagua.semarnat.gob.mx/v.html> A 03 de Enero de 2014.
- Sistema de Información Agropecuario (SIAGRO, 2006) Glosario de términos agropecuarios, económicos y sociales. Incluye los sectores agrícola, pecuario, silvícola y pesca. http://websie.eclac.cl/sisgen/SiagroDoc/GLOSARIO_DEL_SIAGRO.pdf >. pp. 4 - 61. A 25 Septiembre de 2014.
- Sokal, R. R. and Michener, C. D. (1958) «A statistical method for evaluating systematic relationships». University of Kansas Sci. Bull., 38: 1409-1438.
- Smith D.R. (1967) Effects of Cattle Grazing on Ponderosa pine-Punchgrass Range in Colorado. USDA Tech. Bull. 1371 p.
- Soil Survey Division Staff (SSDS, 1993) Soil Survey Manual. Handbook No. 18. USDA. Washington D.C. 437 p.

- Soil Survey Staff (SSS, 1999) Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. 2a. Ed. Agriculture Handbook N° 436. Soil Survey Staff. Washington D. C. 869 p.
- Springall R. (1976) "Hidrología". Universidad Autónoma de México. 11 p.
- Statgraphics (2006) Uso y Manejo del Software Statgraphics. <http://www.ing.unlp.edu.ar/fismat/estadistica/estadistica/archivos/stg1.pdf> 22 p. A 07 de Abril de 2014.
- Tello A. F. (2008) Evaluación del proceso de infiltración en la laguna Churince, valle de Cuatrociénagas, Coahuila. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro". 36 p.
- Tóth, J. (1999) Groundwater as a geologic agent: an overview of the causes, processes, and manifestations: *Hidrogeology Journal.*, 7: 1-14.
- Torres, R. E. (2001) Agro-meteorología. Editorial trillas, México, 84 p.
- Torres G. J. R. (2013) Manual para la Caracterización y el Análisis de Suelos. Laboratorio de la Cañada. Cesder-Prodes. Recopilación y Adaptación. 13 p.
- Villalvazo P. G., Corona M. J. P. y García M. S. (2002) Urbano-rural, constante búsqueda de fronteras conceptuales. Notas. Revista de información y análisis núm. 20. pp. 20 - 23.
- Wang D., Yates S.R., Lowery B., Van Genuchten M. Th., (1998) Estimating soil hydraulic properties using tension infiltrometers with varying disk diameters. *Soil Sci.*, 163, pp. 356-361.
- Ward, J. H., Jr. (1963), "Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function", *Journal of the American Statistical Association.*, 58, 236–244. <http://www.uv.es/ceaces/multivari/cluster/metodos.htm> A 06 de Julio de 2014.
- Ward, R. C. y Robinson, M. (2000) *Principles of hydrology*. Fourth edition. McGraw-Hill Publishing Company. Berkshire, England. ISBN 978-0077095024. 450 p.
- Watson, K. W., y Luxmoore R. J. (1986) Estimating macroporosity in a forest watershed by use of tension infiltrometer. *Soil. Science Society of America Journal.*, 50: 578-587.
- Williams, M. A. J. y Balling, R. C. (1996) Interactions of Desertification and Climate. Arnold-Hadler Headline Group. 132 p.

- Williams J. y Ouyang Y., (1998) Estimation of Infiltration Rate in Vadose zone: Application of Selected Mathematical Models, I, EPA, Oklahoma, Estados Unidos, pp. 1-16.
- Yañez A. N. (2008) Infiltración en el campo experimental Matehuala, San Luis Potosí. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro". 34 p.
- Zúñiga C.(2012) Uso de los Tensiómetros. Universidad de Costa Rica. Estación Experimental Fabio Baudrit. Vinculación la Exportación. 3 p.

IX. ANEXOS

A-1. Tasas de infiltración

A continuación (figuras, de la 1 a la 120) se presentan las regresiones de las pruebas de infiltración en los diferentes tipos y usos de suelo en el área de estudio, realizadas con el fin de estimar la tasa de infiltración en milímetros por hora (mm/h). Se incluye la ecuación para cada regresión, el valor de R^2 y la significancia estadística (Sig.); los tipos y usos de suelo evaluados se presentan abreviados de la siguiente forma: Feozem=Fz, Fluvisol=Fv, Litosol=Lt, Luvisol=Lv, Regosol=Rg, Rendzina=Rz, Vertisol=Vt, Xerosol=Xe, Agrícola=Agri, Forestal=Fore, Ganadero=Gan, Rural=Rur y Urbano=Urb.

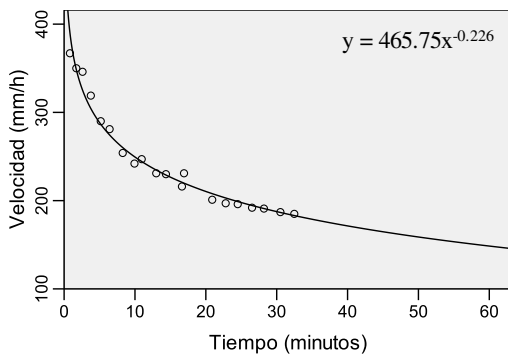


Figura A-1. Prueba FzAgri_1; $R^2 = 0.98$; Sig. < 0.01 ; Infiltración: 149 mm/h. N=20.

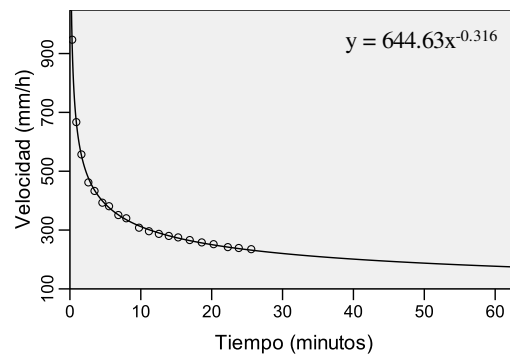


Figura A-2. Prueba FzAgri_2; $R^2 = 0.99$; Sig. < 0.01 ; Infiltración: 181 mm/h. N=20.

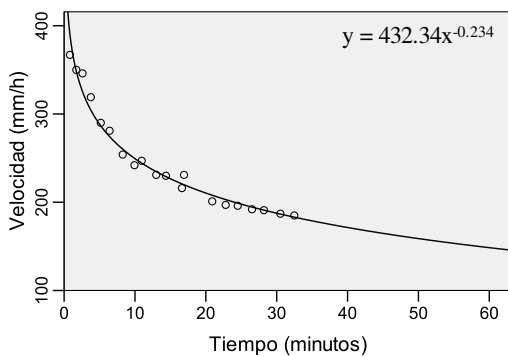


Figura A-3. Prueba FzAgri_3; $R^2 = 0.91$; Sig. < 0.01 Infiltración: 166 mm/h. N=20.

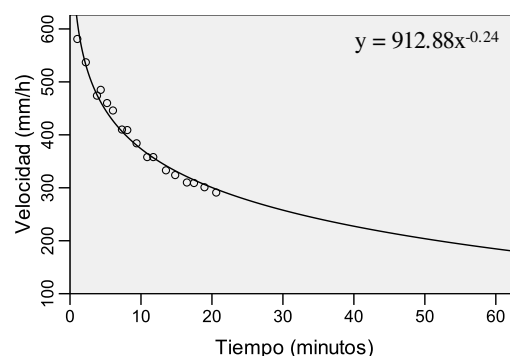


Figura A-4. Prueba FzAgri_4; $R^2 = 0.98$; Sig. < 0.01 Infiltración: 185 mm/h. N=20.

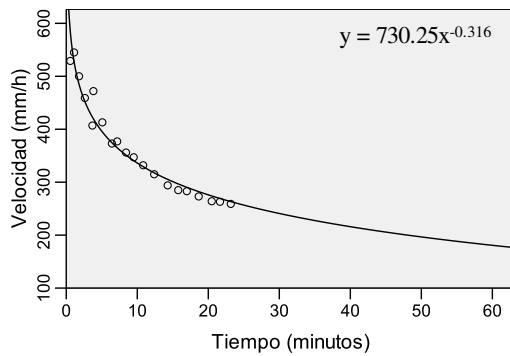


Figura A-5. Prueba FzAgri_5; $R^2 = 0.95$; Sig. < 0.01 Infiltración: 181 mm/h. N=20.

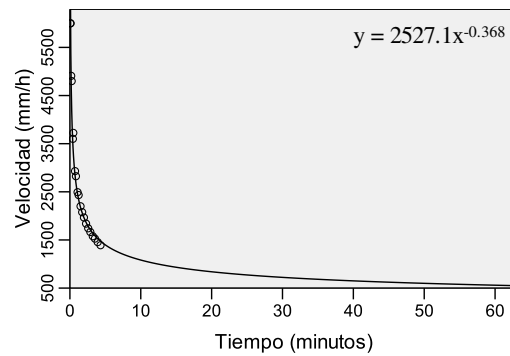


Figura A-6. Prueba FzFore_1; $R^2 = 0.98$; Sig. < 0.01 Infiltración: 579 mm/h. N=20.

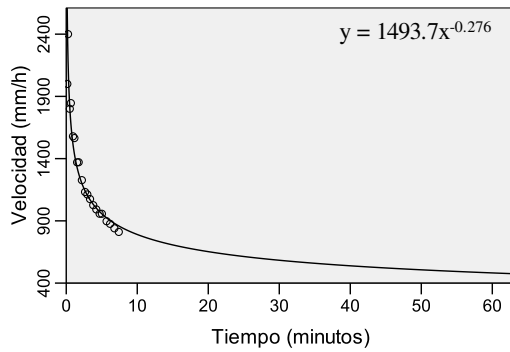


Figura A-7. Prueba FzFore_2; $R^2 = 0.95$; Sig. < 0.01 Infiltración: 482 mm/h. N=20.

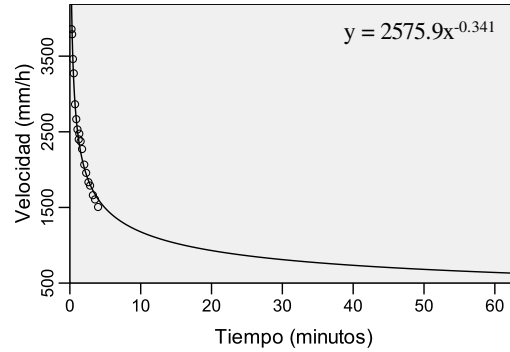


Figura A-8. Prueba FzFore_3; $R^2 = 0.98$; Sig. < 0.01 Infiltración: 637 mm/h. N=20.

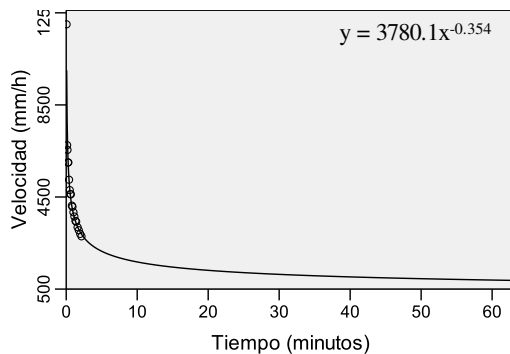


Figura A-9. Prueba FzFore_4; $R^2 = 0.98$; Sig. < 0.01 Infiltración: 902 mm/h. N=20.

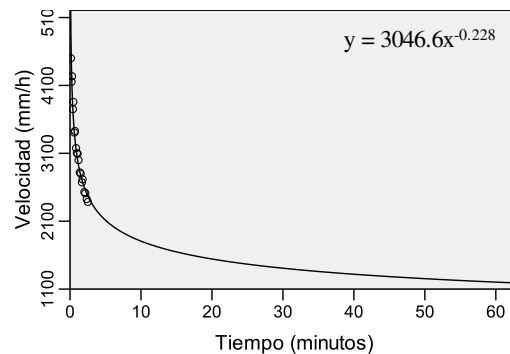


Figura A-10. Prueba FzFore_5; $R^2 = 0.97$; Sig. < 0.01 Infiltración: 1198 mm/h. N=20.

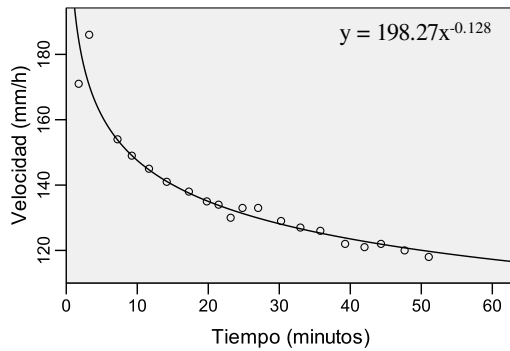


Figura A-11. Prueba FzGan_1; $R^2 = 0.94$; Sig. < 0.01 Infiltración: 117 mm/h. N=20.

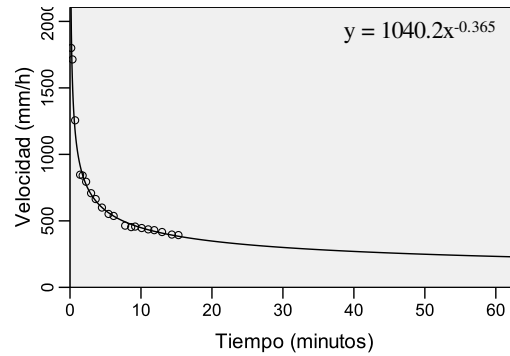


Figura A-12. Prueba FzGan_2; $R^2 = 0.99$; Sig. < 0.01 Infiltración: 233 mm/h. N=20.

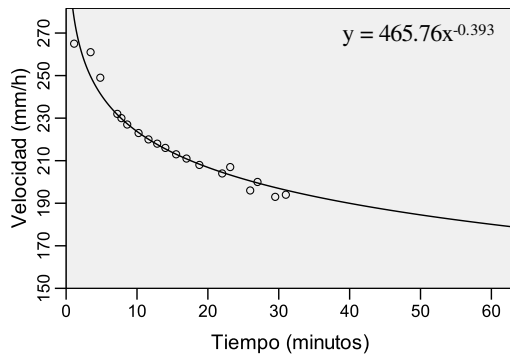


Figura A-13. Prueba FzGan_3; $R^2 = 0.95$; Sig. < 0.01 Infiltración: 180 mm/h. N=20.

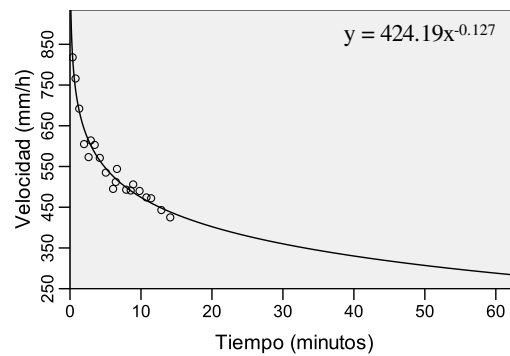


Figura A-14. Prueba FzGan_4; $R^2 = 0.96$; Sig. < 0.01 Infiltración: 292 mm/h. N=20.

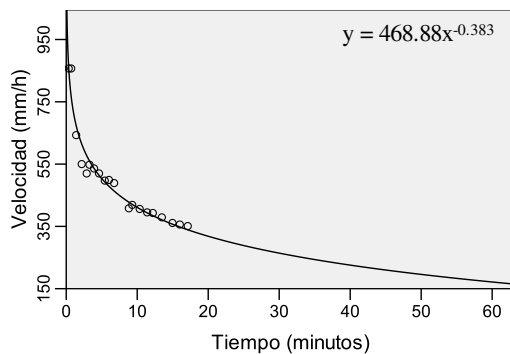


Figura A-15. Prueba FzGan_5; $R^2 = 0.95$; Sig. < 0.01 Infiltración: 174 mm/h. N=20.

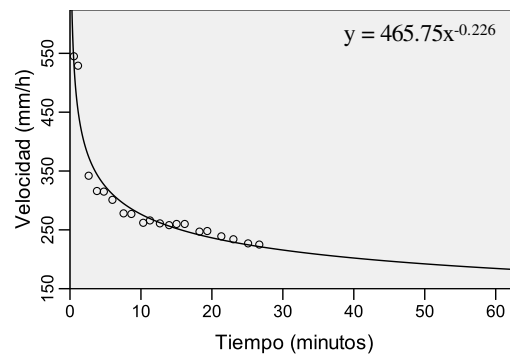


Figura A-16. Prueba FzRur_1; $R^2 = 0.95$; Sig. < 0.01 Infiltración: 189 mm/h. N=20.

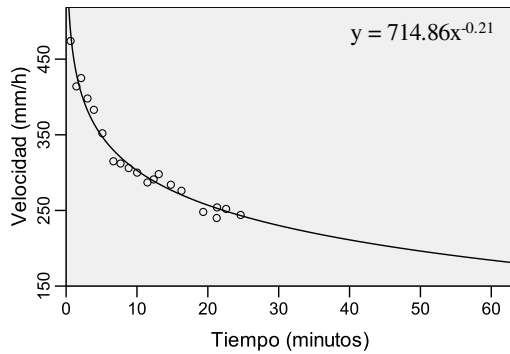


Figura A-17. Prueba FzRur_2; $R^2 = 0.97$; Sig. < 0.01 Infiltración: 185 mm/h. N=20.

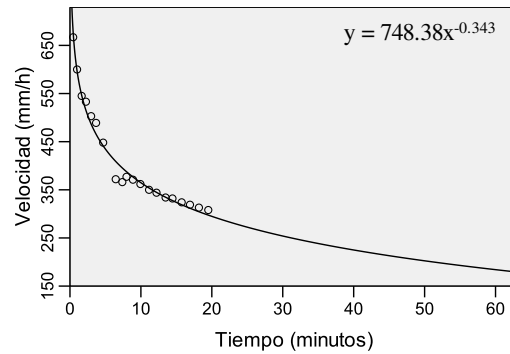


Figura A-18. Prueba FzRur_3; $R^2 = 0.98$; Sig. < 0.01 Infiltración: 187 mm/h. N=20.

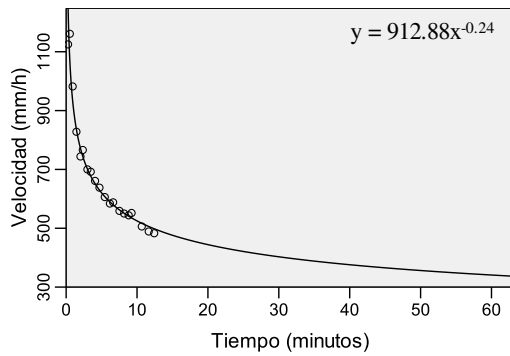


Figura A-19. Prueba FzRur_4; $R^2 = 0.97$; Sig. < 0.01 Infiltración: 342 mm/h. N=20.

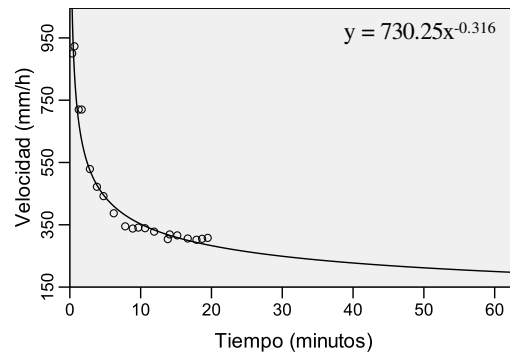


Figura A-20. Prueba FzRur_5; $R^2 = 0.96$; Sig. < 0.01 Infiltración: 205 mm/h. N=20.

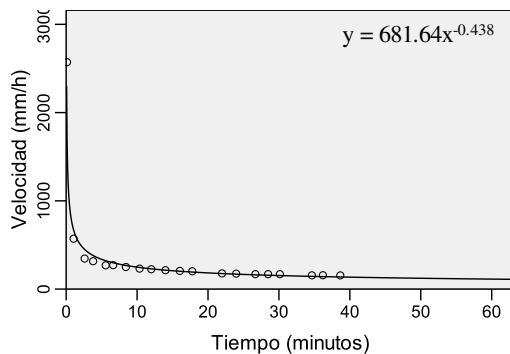


Figura A-21. Prueba FvRur_1; $R^2 = 0.95$; Sig. < 0.01 Infiltración: 113 mm/h. N=20.

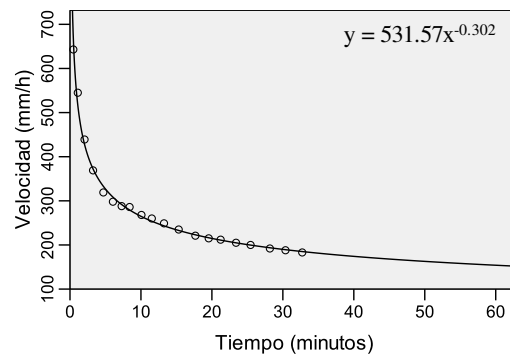


Figura A-22. Prueba FvRur_2; $R^2 = 0.99$; Sig. < 0.01 Infiltración: 154 mm/h. N=20.

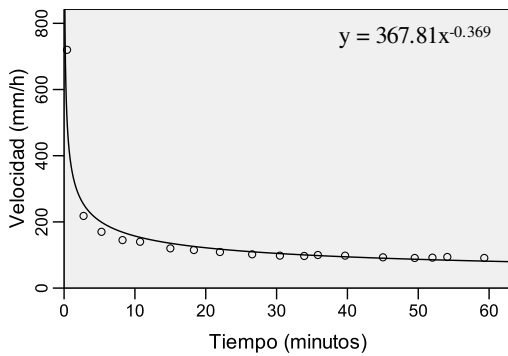


Figura A-23. Prueba FvRur_3; $R^2 = 0.93$; Sig. < 0.01 Infiltración: 81 mm/h. N=20.

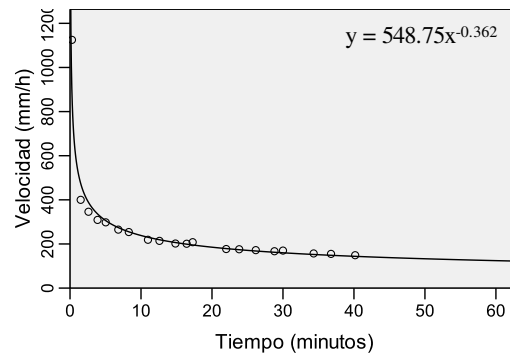


Figura A-24. Prueba FvRur_4; $R^2 = 0.97$; Sig. < 0.01 Infiltración: 125 mm/h. N=20.

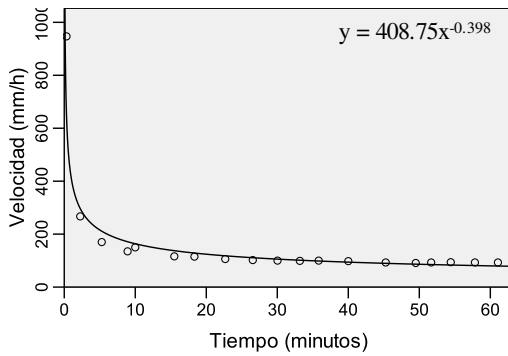


Figura A-25. Prueba FvRur_5; $R^2 = 0.92$; Sig. < 0.01 Infiltración: 80 mm/h. N=20.

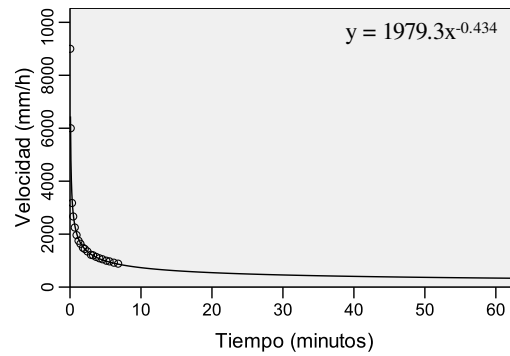


Figura A-26. Prueba LtAgri_1; $R^2 = 0.99$; Sig. < 0.01 Infiltración: 335 mm/h. N=20.

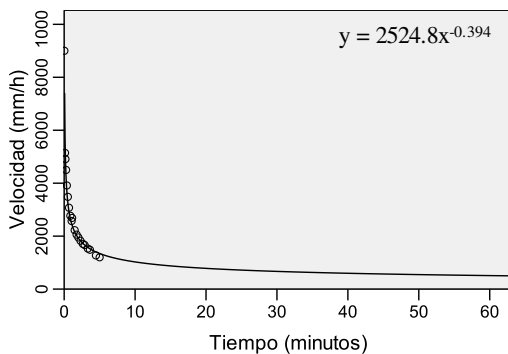


Figura A-27. Prueba LtAgri_2; $R^2 = 0.98$; Sig. < 0.01 Infiltración: 503 mm/h. N=20.

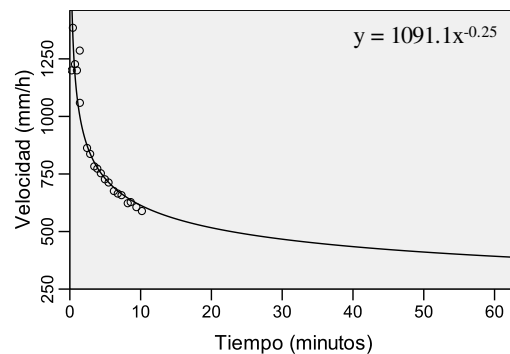


Figura A-28. Prueba LtAgri_3; $R^2 = 0.90$; Sig. < 0.01 Infiltración: 392 mm/h. N=20.

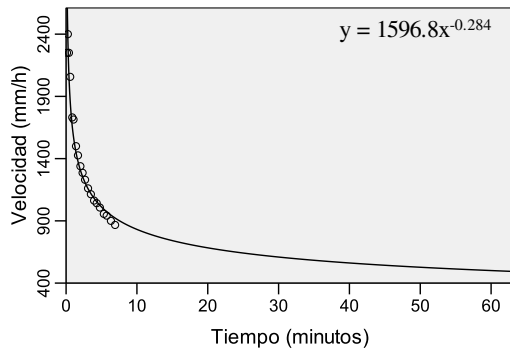


Figura A-29. Prueba LtAgri_4; $R^2 = 0.95$; Sig. < 0.01 Infiltración: 499 mm/h. N=20.

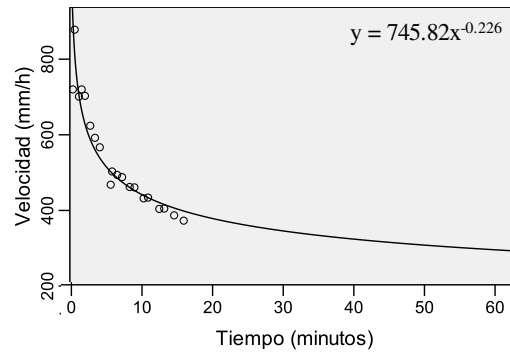


Figura A-30. Prueba LtAgri_5; $R^2 = 0.91$; Sig. < 0.01 Infiltración: 296 mm/h. N=20.

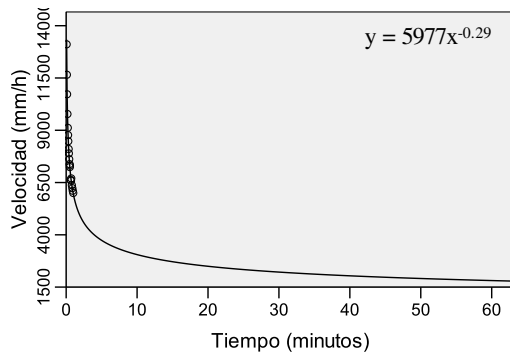


Figura A-31. Prueba LtFore_1; $R^2 = 0.99$; Sig. < 0.01 Infiltración: 1823 mm/h. N=20.

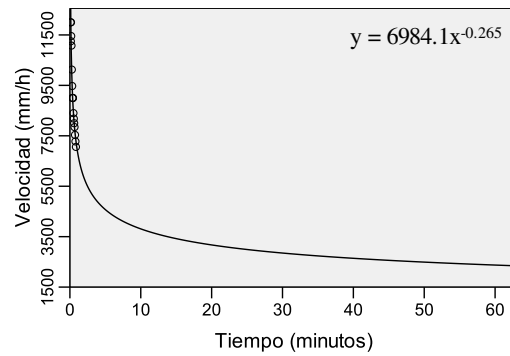


Figura A-32. Prueba LtFore_2; $R^2 = 0.96$; Sig. < 0.01 Infiltración: 2360 mm/h. N=20.

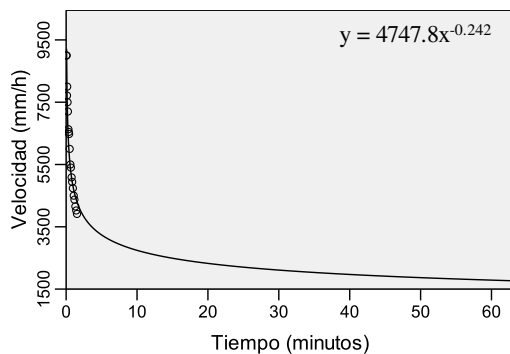


Figura A-33. Prueba LtFore_3; $R^2 = 0.92$; Sig. < 0.01 Infiltración: 1763 mm/h. N=20.

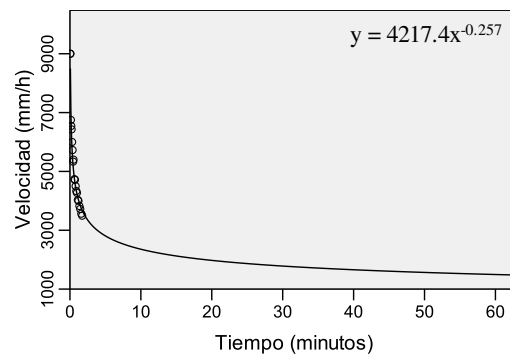


Figura A-34. Prueba LtFore_4; $R^2 = 0.97$; Sig. < 0.01 Infiltración: 1473 mm/h. N=20.

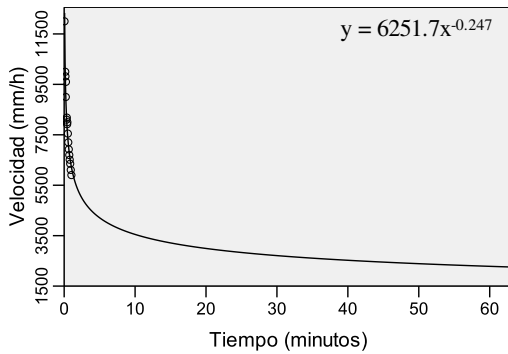


Figura A-35. Prueba LtFore_5; $R^2 = 0.96$; Sig. < 0.01 Infiltración: 2274 mm/h. N=20.

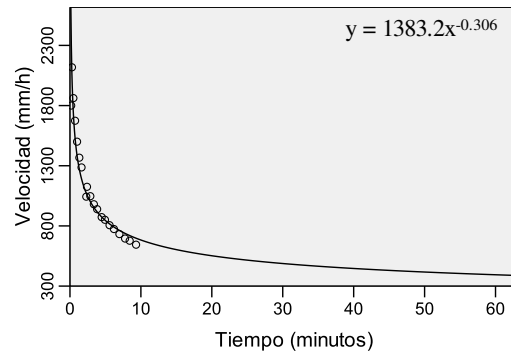


Figura A-36. Prueba LtGan_1; $R^2 = 0.95$; Sig. < 0.01 Infiltración: 395 mm/h. N=20.

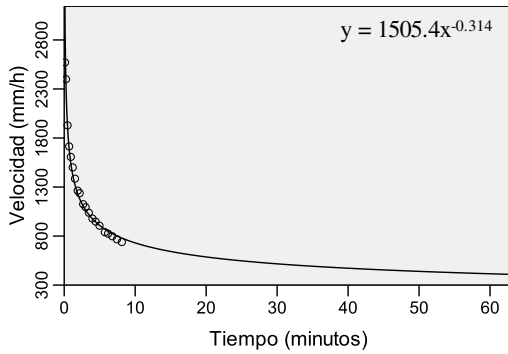


Figura A-37. Prueba LtGan_2; $R^2 = 0.98$; Sig. < 0.01 Infiltración: 416 mm/h. N=20.

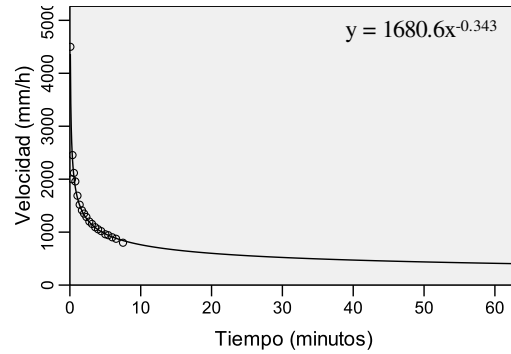


Figura A-38. Prueba LtGan_3; $R^2 = 0.98$; Sig. < 0.01 Infiltración: 413 mm/h. N=20.

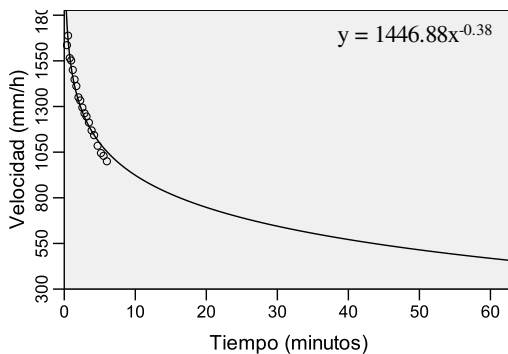


Figura A-39. Prueba LtGan_4; $R^2 = 0.96$; Sig. < 0.01 Infiltración: 470 mm/h. N=20.

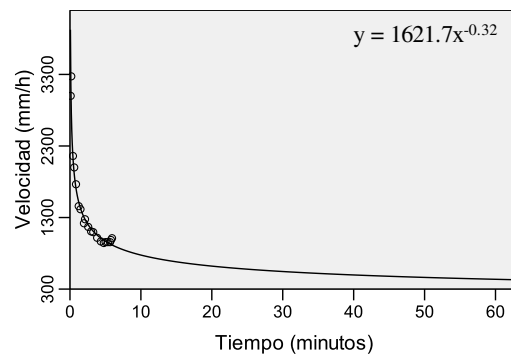


Figura A-40. Prueba LtGan_5; $R^2 = 0.98$; Sig. < 0.01 Infiltración: 437 mm/h. N=20.

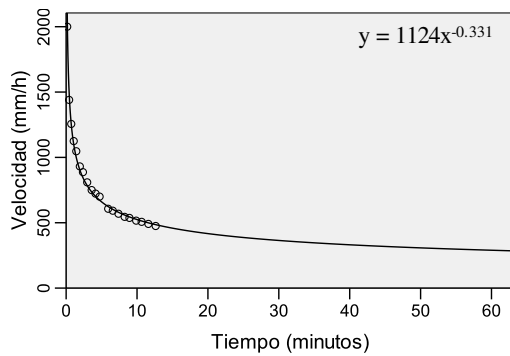


Figura A-41. Prueba LtRur_1; $R^2 = 0.99$; Sig. < 0.01 Infiltración: 290 mm/h. N=20.

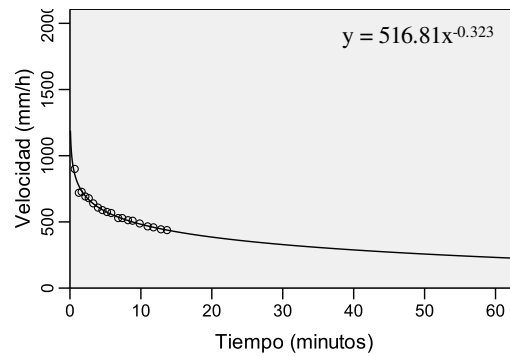


Figura A-42. Prueba LtRur_2; $R^2 = 0.98$ Sig. < 0.01 Infiltración: 232 mm/h. N=20.

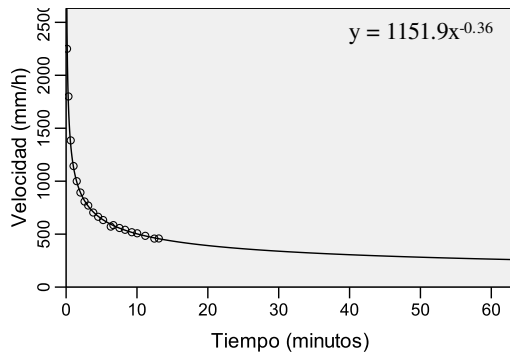


Figura A-43. Prueba LtRur_3; $R^2 = 0.99$; Sig. < 0.01 Infiltración: 264 mm/h. N=20.

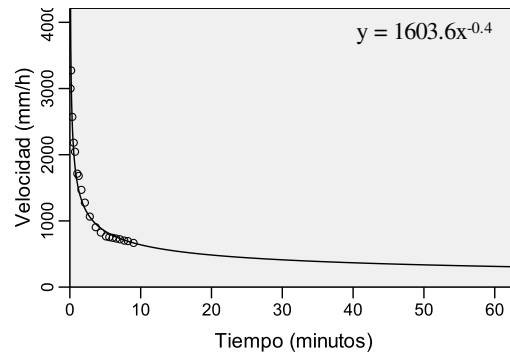


Figura A-44. Prueba LtRur_4; $R^2 = 0.97$; Sig. < 0.01 Infiltración: 312 mm/h. N=20.

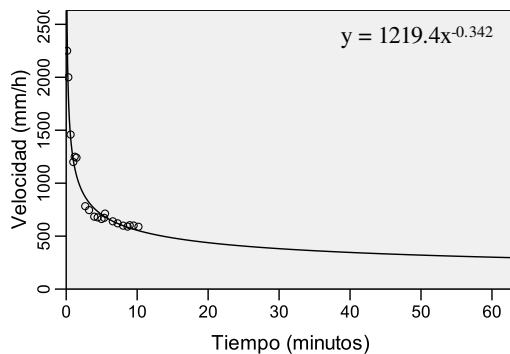


Figura A-45. Prueba LtRur_5; $R^2 = 0.97$; Sig. < 0.01 Infiltración: 301 mm/h. N=20.

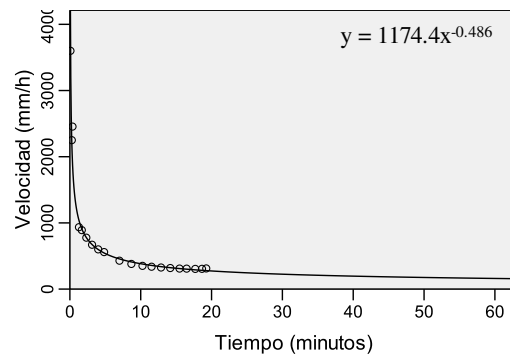


Figura A-46. Prueba LvAgri_1; $R^2 = 0.99$; Sig. < 0.01 Infiltración: 161 mm/h. N=20.

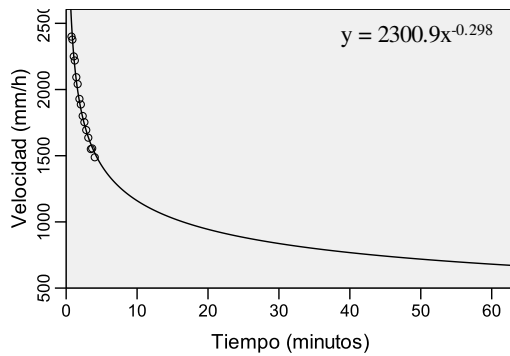


Figura A-47. Prueba LvAgri_2; $R^2 = 0.99$; Sig. < 0.01 Infiltración: 679 mm/h. N=20.

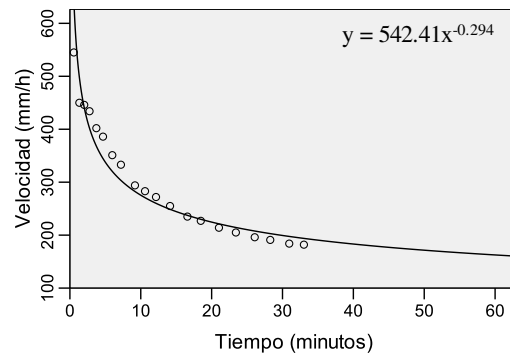


Figura A-48. Prueba LvAgri_3; $R^2 = 0.95$; Sig. < 0.01 Infiltración: 163 mm/h. N=20.

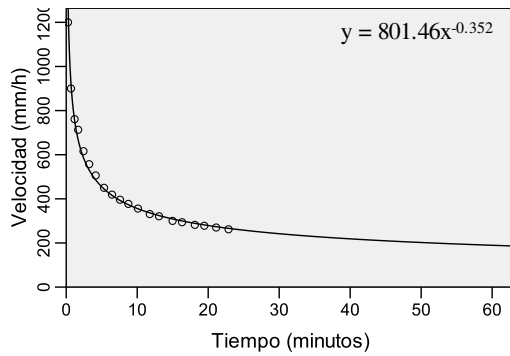


Figura A-49. Prueba LvAgri_4; $R^2 = 0.99$; Sig. < 0.01 Infiltración: 190 mm/h. N=20.

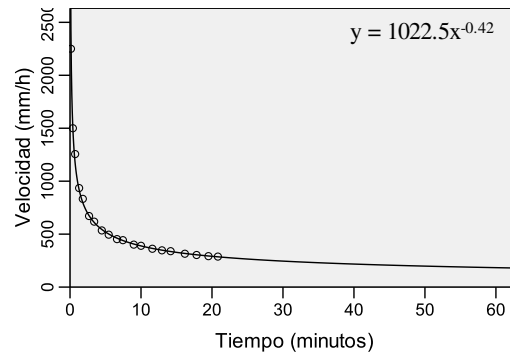


Figura A-50. Prueba LvAgri_5; $R^2 = 0.99$; Sig. < 0.01 Infiltración: 183 mm/h. N=20.

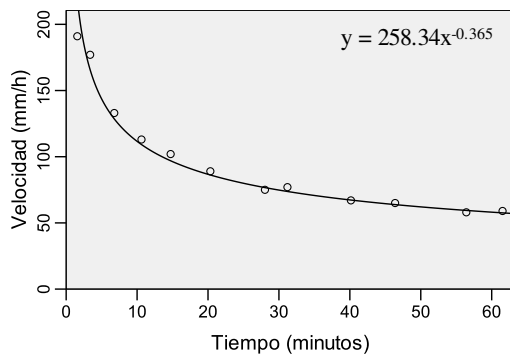


Figura A-51. Prueba LvFore_1; $R^2 = 0.99$; Sig. < 0.01 Infiltración: 58 mm/h. N=20.

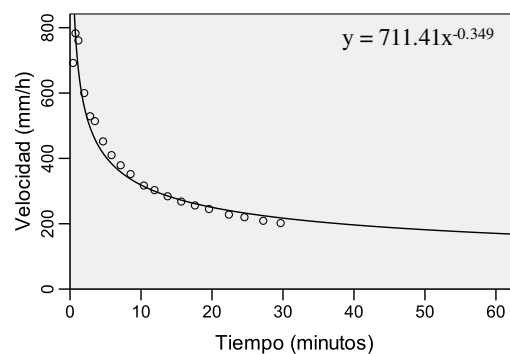


Figura A-52. Prueba LvFore_2; $R^2 = 0.95$; Sig. < 0.01 Infiltración: 170 mm/h. N=20.

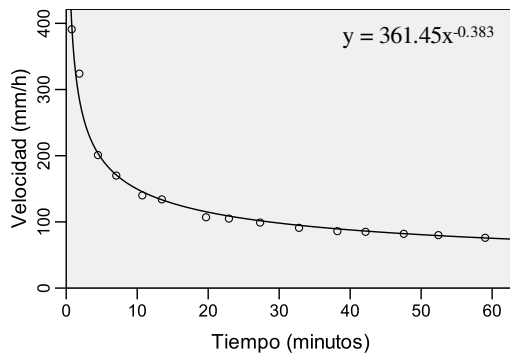


Figura A-53. Prueba LvFore_3; $R^2 = 0.99$; Sig. < 0.01 Infiltración: 75 mm/h. N=20.

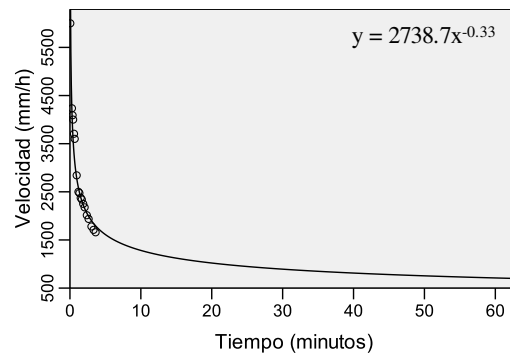


Figura A-54. Prueba LvFore_4; $R^2 = 0.95$; Sig. < 0.01 Infiltración: 709 mm/h. N=20.

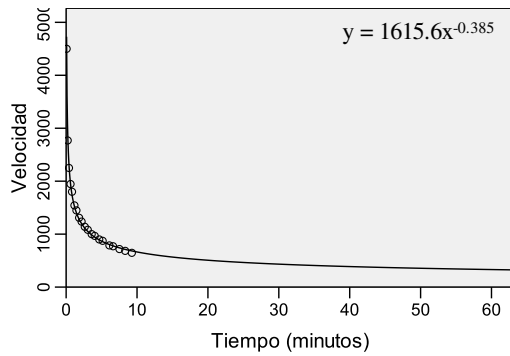


Figura A-55. Prueba LvFore_5; $R^2 = 0.99$; Sig. < 0.01 Infiltración: 334 mm/h. N=20.

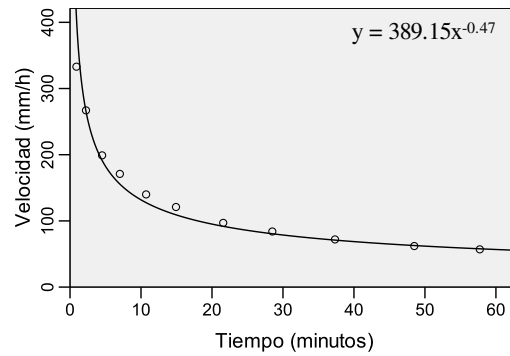


Figura A-56. Prueba LvGan_1; $R^2 = 0.99$; Sig. < 0.01 Infiltración: 57 mm/h. N=20.

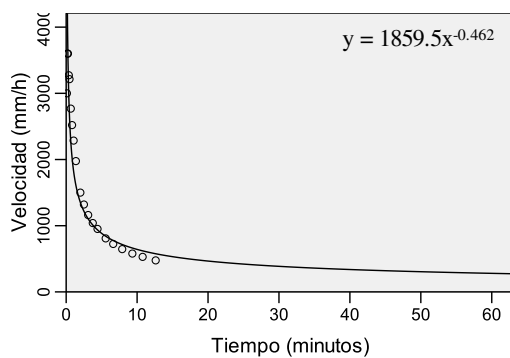


Figura A-57. Prueba LvGan_2; $R^2 = 0.92$; Sig. < 0.01 Infiltración: 280 mm/h. N=20.

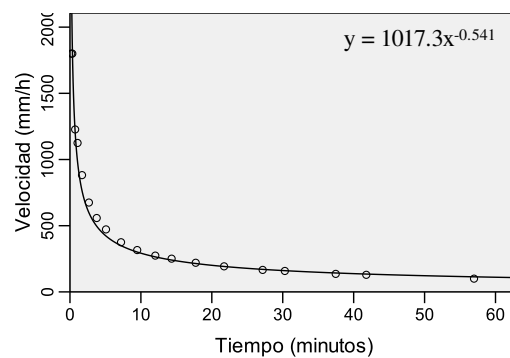


Figura A-58. Prueba LvGan_3; $R^2 = 0.98$; Sig. < 0.01 Infiltración: 111 mm/h. N=20.

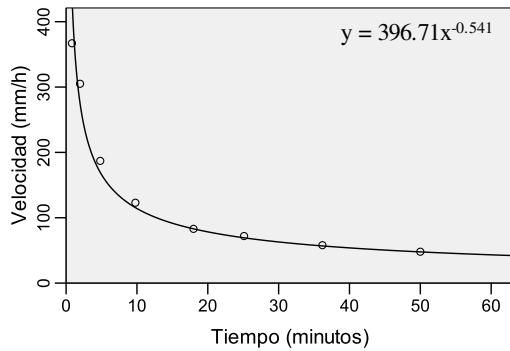


Figura A-59. Prueba LvGan_4; $R^2 = 0.99$; Sig. < 0.01 Infiltración: 43 mm/h. N=20.

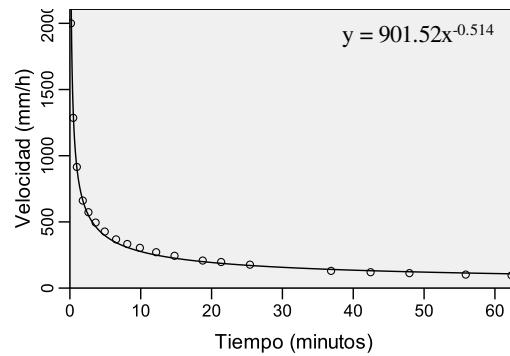


Figura A-60. Prueba LvGan_5; $R^2 = 0.99$; Sig. < 0.01 Infiltración: 110 mm/h. N=20.

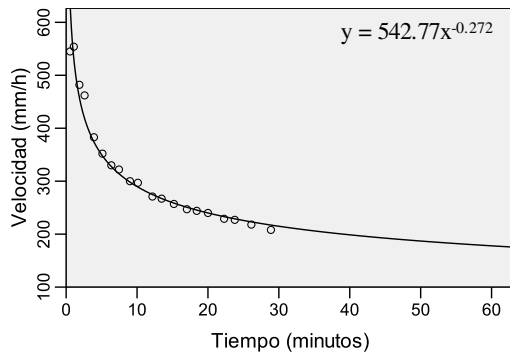


Figura A-61. Prueba LvRur_1; $R^2 = 0.97$; Sig. < 0.01 Infiltración: 178 mm/h. N=20.

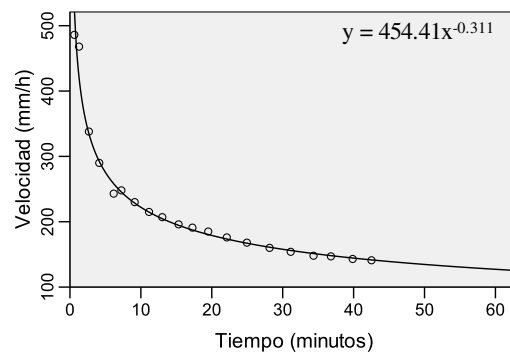


Figura A-62. Prueba LvRur_2; $R^2 = 0.99$; Sig. < 0.01 Infiltración: 127 mm/h. N=20.

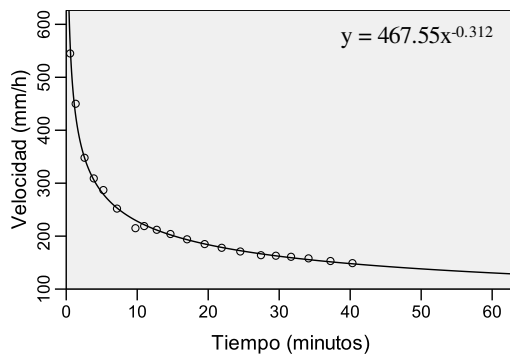


Figura A-63. Prueba LvRur_3; $R^2 = 0.99$; Sig. < 0.01 Infiltración: 130 mm/h. N=20.

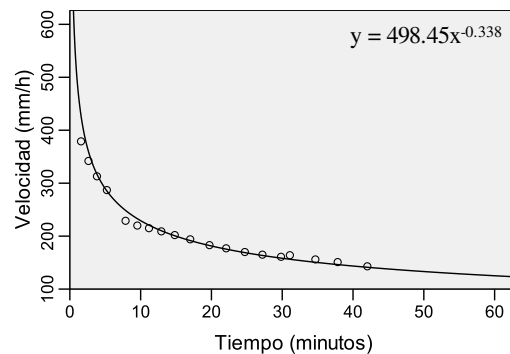


Figura A-64. Prueba LvRur_4; $R^2 = 0.98$; Sig. < 0.01 Infiltración: 125 mm/h. N=20.

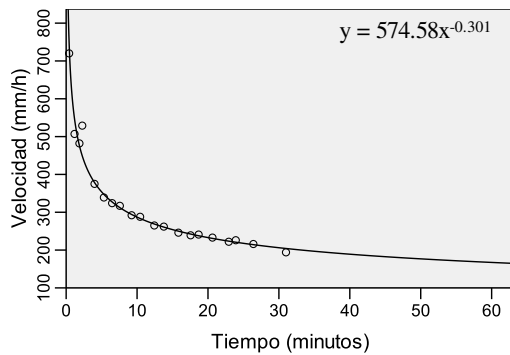


Figura A-65. Prueba LvRur_5; $R^2 = 0.98$; Sig. < 0.01 Infiltración: 168 mm/h. N=20.

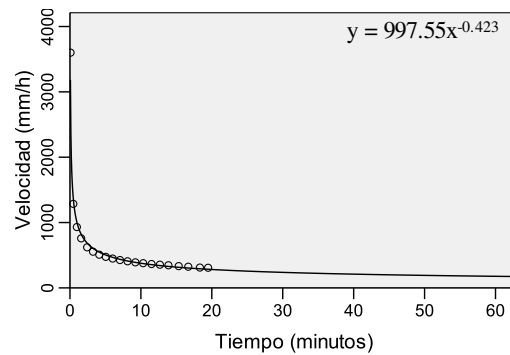


Figura A-66. Prueba RgAgri_1; $R^2 = 0.98$; Sig. < 0.01 Infiltración: 177 mm/h. N=20.

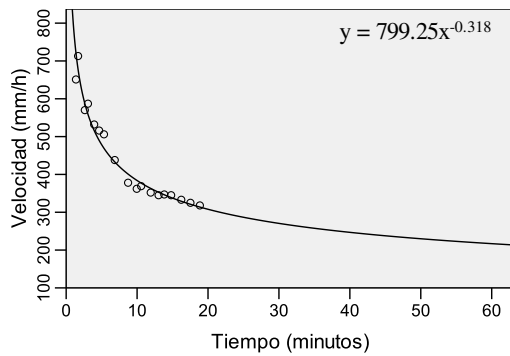


Figura A-67. Prueba RgAgri_2; $R^2 = 0.97$; Sig. < 0.01 Infiltración: 217 mm/h. N=20.

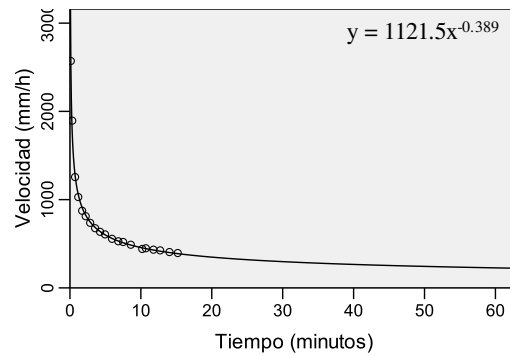


Figura A-68. Prueba RgAgri_3; $R^2 = 0.99$; Sig. < 0.01 Infiltración: 228 mm/h. N=20.

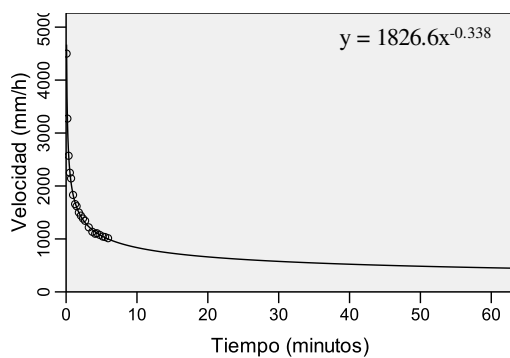


Figura A-69. Prueba RgAgri_4; $R^2 = 0.99$; Sig. < 0.01 Infiltración: 458 mm/h. N=20.

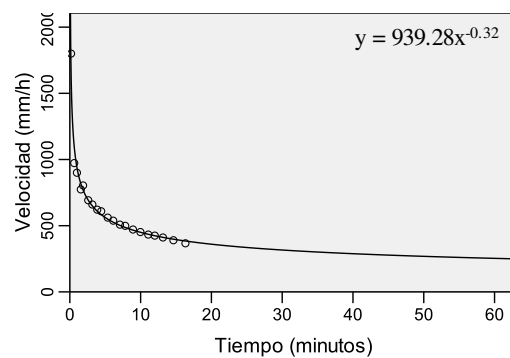


Figura A-70. Prueba RgAgri_5; $R^2 = 0.99$; Sig. < 0.01 Infiltración: 253 mm/h. N=20.

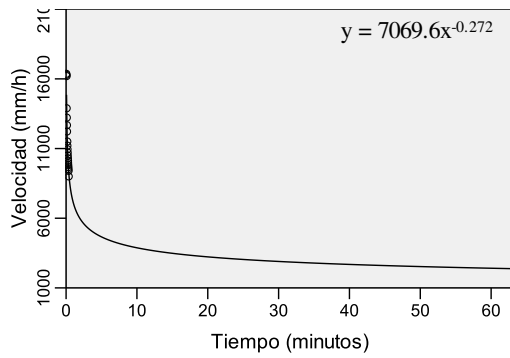


Figura A-71. Prueba RgFore_1; $R^2 = 0.97$; Sig. < 0.01 Infiltración: 2320 mm/h. N=20.

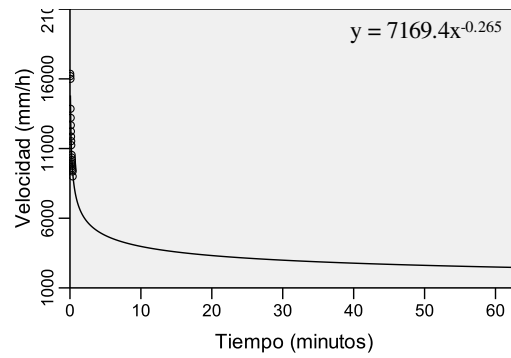


Figura A-72. Prueba RgFore_2; $R^2 = 0.98$; Sig. < 0.01 Infiltración: 2423 mm/h. N=20.

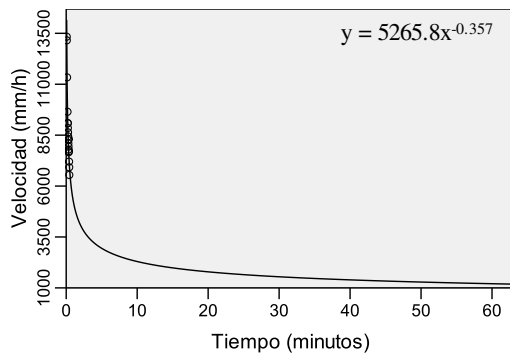


Figura A-73. Prueba RgFore_3; $R^2 = 0.97$; Sig. < 0.01 Infiltración: 1221 mm/h. N=20.

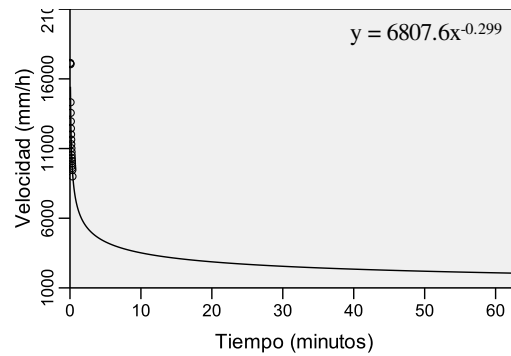


Figura A-74. Prueba RgFore_4; $R^2 = 0.97$; Sig. < 0.01 Infiltración: 2003 mm/h. N=20.

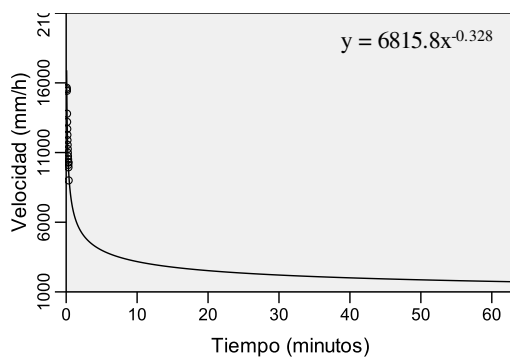


Figura A-75. Prueba RgFore_5; $R^2 = 0.97$; Sig. < 0.01 Infiltración: 1779 mm/h. N=20.

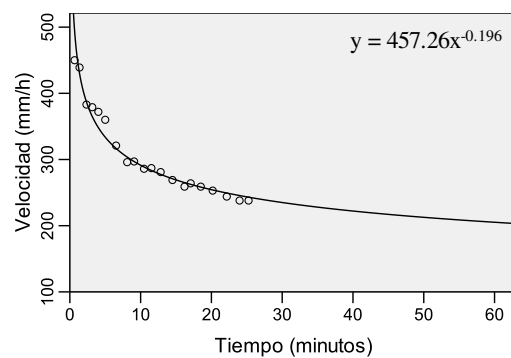


Figura A-76. Prueba RgGan_1; $R^2 = 0.97$; Sig. < 0.01 Infiltración: 205 mm/h. N=20.

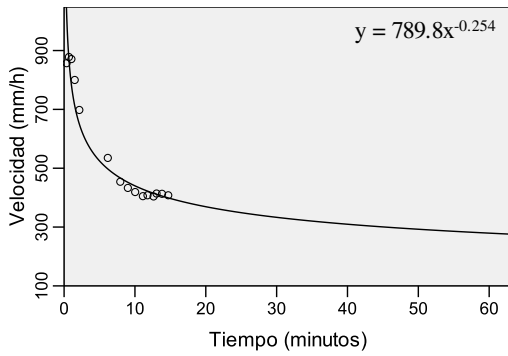


Figura A-77. Prueba RgGan_2; $R^2 = 0.95$; Sig. < 0.01 Infiltración: 279 mm/h. N=20.

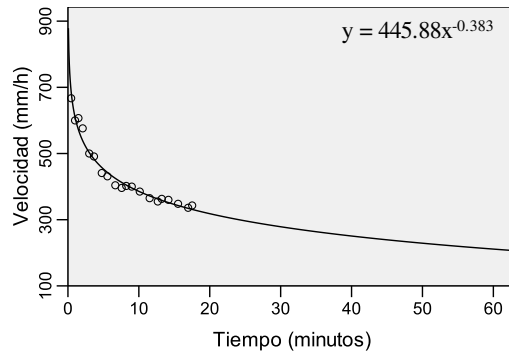


Figura A-78. Prueba RgGan_3; $R^2 = 0.98$; Sig. < 0.01 Infiltración: 211 mm/h. N=20.

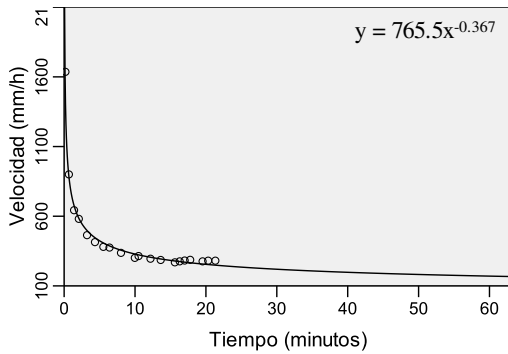


Figura A-79. Prueba RgGan_4; $R^2 = 0.98$; Sig. < 0.01 Infiltración: 170 mm/h. N=20.

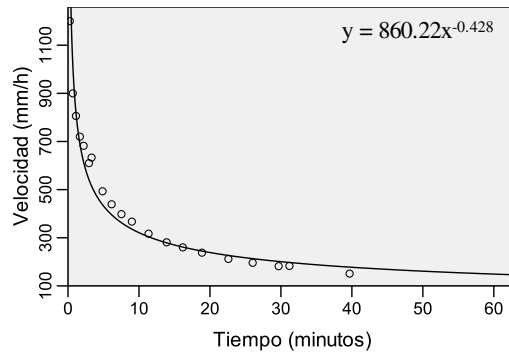


Figura A-80. Prueba RgGan_5; $R^2 = 0.96$; Sig. < 0.01 Infiltración: 140 mm/h. N=20.

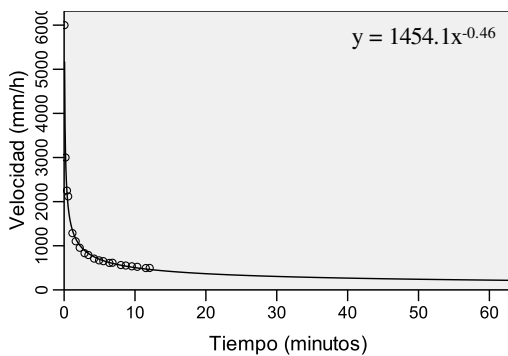


Figura A-81. Prueba RgRur_1; $R^2 = 0.99$; Sig. < 0.01 Infiltración: 221 mm/h. N=20.

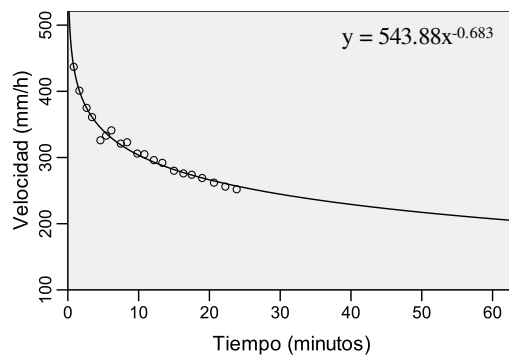


Figura A-82. Prueba RgRur_2; $R^2 = 0.98$; Sig. < 0.01 Infiltración: 207 mm/h. N=20.

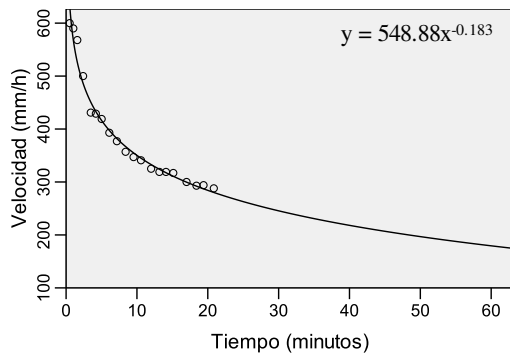


Figura A-83. Prueba RgRur_3; $R^2 = 0.98$; Sig. < 0.01 Infiltración: 179 mm/h. N=20.

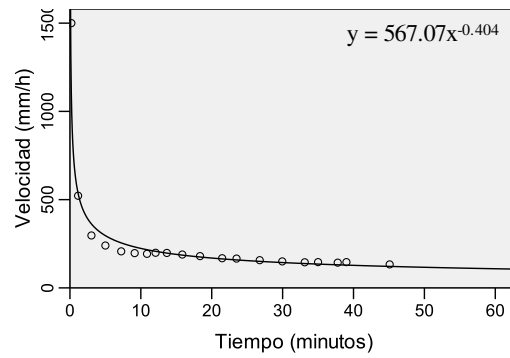


Figura A-84. Prueba RgRur_4; $R^2 = 0.95$; Sig. < 0.01 Infiltración: 107 mm/h. N=20.

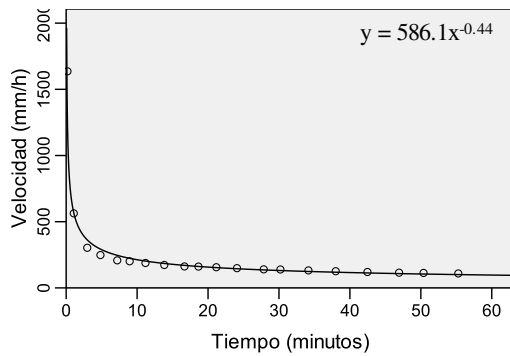


Figura A-85. Prueba RgRur_5; $R^2 = 0.97$; Sig. < 0.01 Infiltración: 97 mm/h. N=20.

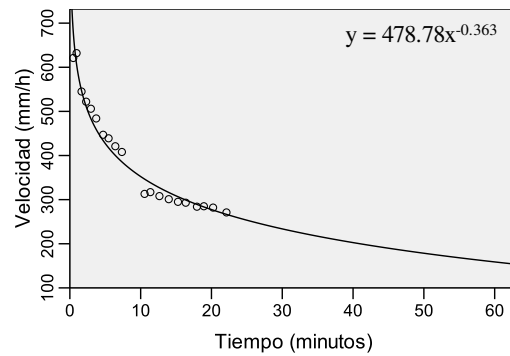


Figura A-86. Prueba RzAgri_1; $R^2 = 0.97$; Sig. < 0.01 Infiltración: 159 mm/h. N=20.

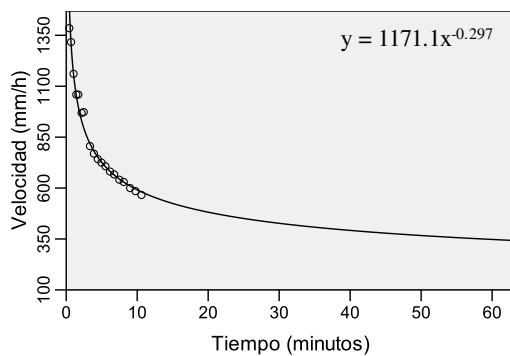


Figura A-87. Prueba RzAgri_2; $R^2 = 0.99$; Sig. < 0.01 Infiltración: 347 mm/h. N=20.

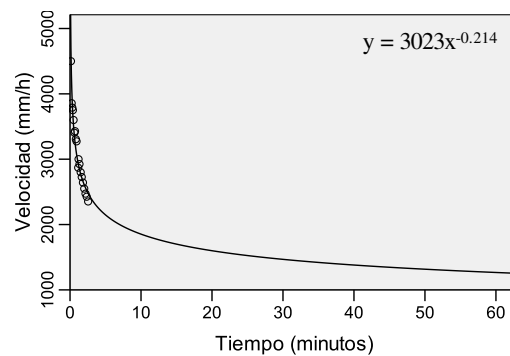


Figura A-88. Prueba RzAgri_3; $R^2 = 0.96$; Sig. < 0.01 Infiltración: 1259 mm/h. N=20.

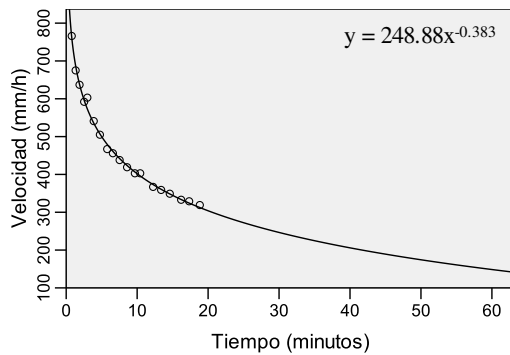


Figura A-89. Prueba RzAgri_4; $R^2 = 0.99$; Sig. < 0.01 Infiltración: 148 mm/h. N=20.

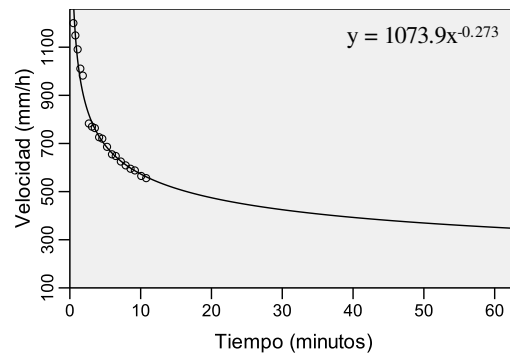


Figura A-90. Prueba RzAgri_5; $R^2 = 0.98$; Sig. < 0.01 Infiltración: 351 mm/h. N=20.

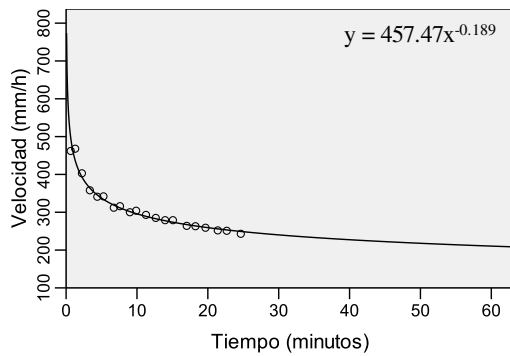


Figura A-91. Prueba RzGan_1; $R^2 = 0.98$; Sig. < 0.01 Infiltración: 221 mm/h. N=20.

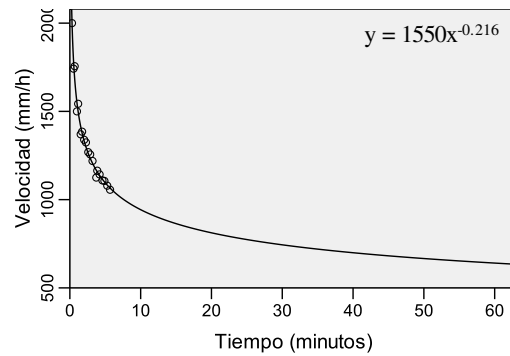


Figura A-92. Prueba RzGan_2; $R^2 = 0.99$; Sig. < 0.01 Infiltración: 640 mm/h. N=20.

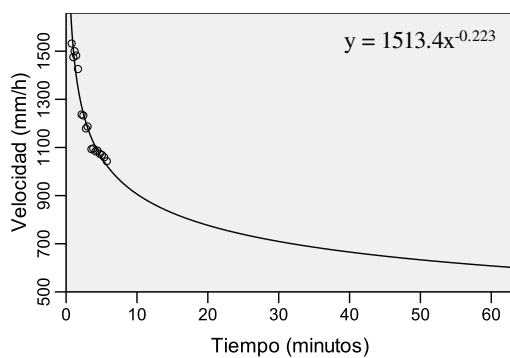


Figura A-93. Prueba RzGan_3; $R^2 = 0.96$; Sig. < 0.01 Infiltración: 607 mm/h. N=20.

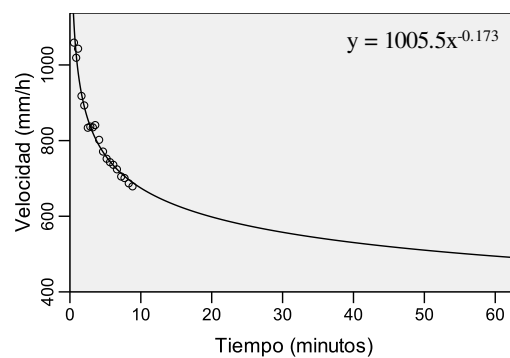


Figura A-94. Prueba RzGan_4; $R^2 = 0.97$; Sig. < 0.01 Infiltración: 495 mm/h. N=20.

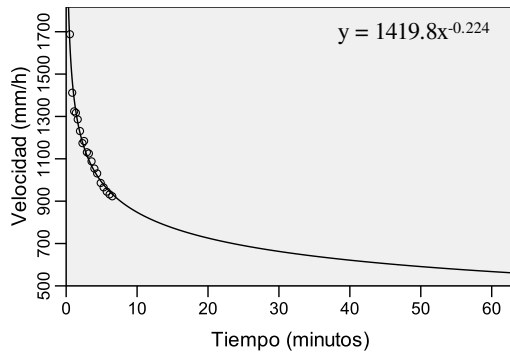


Figura A-95. Prueba RzGan_5; $R^2 = 0.98$; Sig. < 0.01 Infiltración: 567 mm/h. N=20.

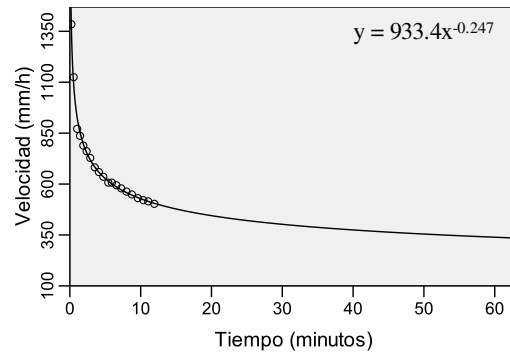


Figura A-96. Prueba RzRur_1; $R^2 = 0.99$; Sig. < 0.01 Infiltración: 340 mm/h. N=20.

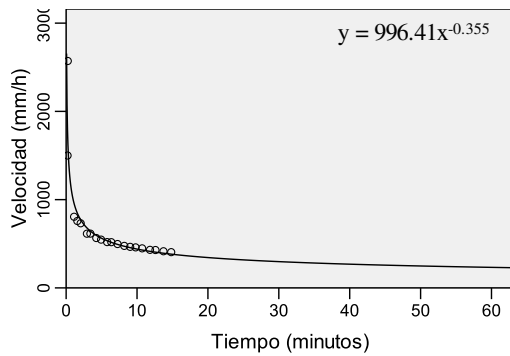


Figura A-97. Prueba RzRur_2; $R^2 = 0.93$; Sig. < 0.01 Infiltración: 233 mm/h. N=20.

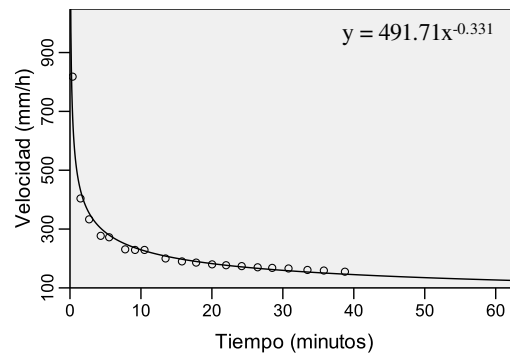


Figura A-98. Prueba RzRur_3; $R^2 = 0.98$; Sig. < 0.01 Infiltración: 127 mm/h. N=20.

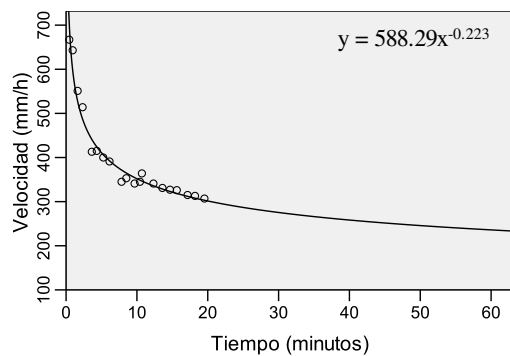


Figura A-99. Prueba RzRur_4; $R^2 = 0.97$; Sig. < 0.01 Infiltración: 236 mm/h. N=20.

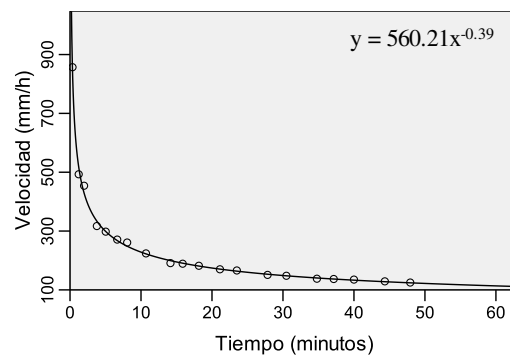


Figura A-100. Prueba RzRur_5; $R^2 = 0.99$; Sig. < 0.01 Infiltración: 113 mm/h. N=20.

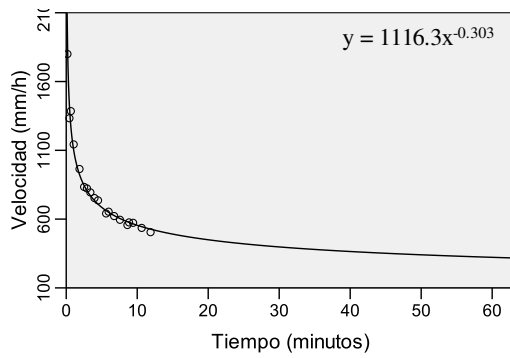


Figura A-101. Prueba VtAgri_1; $R^2 = 0.99$; Sig. < 0.01 Infiltración: 323 mm/h. N=20.

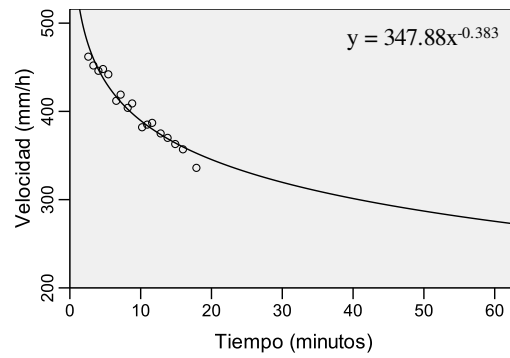


Figura A-102. Prueba VtAgri_2; $R^2 = 0.95$; Sig. < 0.01 Infiltración: 275 mm/h. N=20.

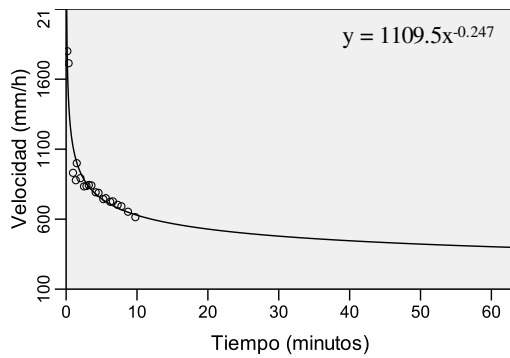


Figura A-103. Prueba VtAgri_3; $R^2 = 0.93$; Sig. < 0.01 Infiltración: 404 mm/h. N=20.

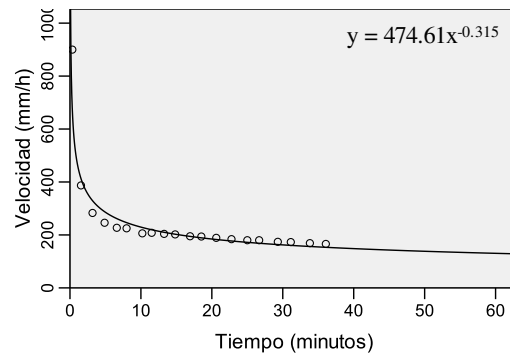


Figura A-104. Prueba VtAgri_4; $R^2 = 0.92$; Sig. < 0.01 Infiltración: 131 mm/h. N=20.

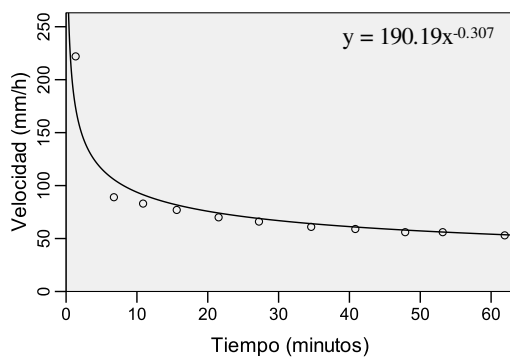


Figura A-105. Prueba VtAgri_5; $R^2 = 0.95$; Sig. < 0.01 Infiltración: 54 mm/h. N=20.

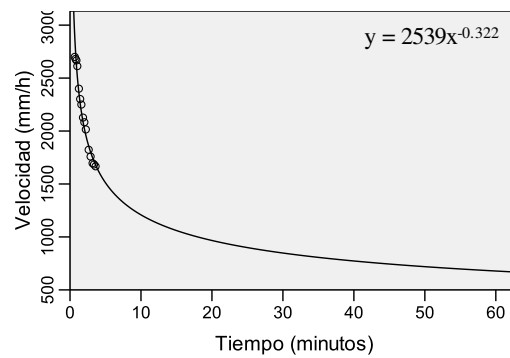


Figura A-106. Prueba VtFore_1; $R^2 = 0.97$; Sig. < 0.01 Infiltración: 679 mm/h. N=20.

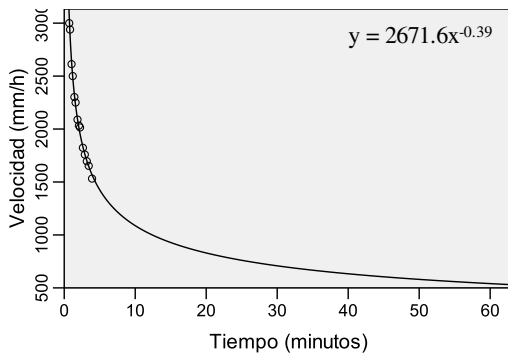


Figura A-107. Prueba VtFore_2; $R^2 = 0.99$; Sig. < 0.01 Infiltración: 541 mm/h. N=20.

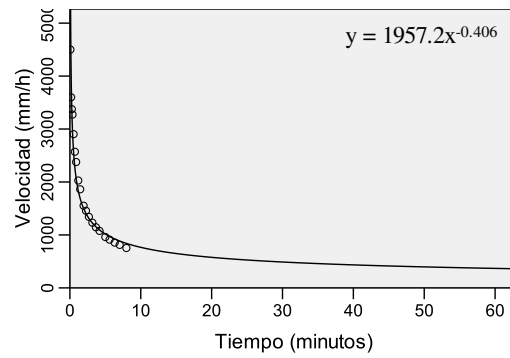


Figura A-108. Prueba VtFore_3; $R^2 = 0.97$; Sig. < 0.01 Infiltración: 371 mm/h. N=20.

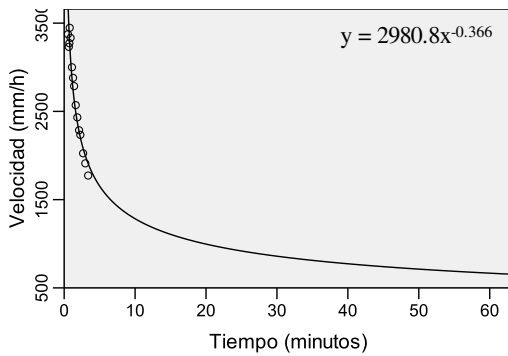


Figura A-109. Prueba VtFore_4; $R^2 = 0.94$; Sig. < 0.01 Infiltración: 666 mm/h. N=20.

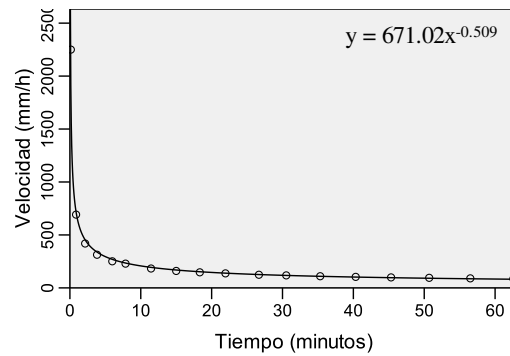


Figura A-110. Prueba VtFore_5; $R^2 = 0.99$; Sig. < 0.01 Infiltración: 83 mm/h. N=20.

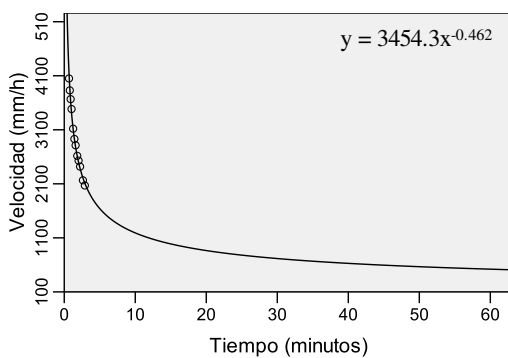


Figura A-111. Prueba VtGan_1; $R^2 = 0.99$; Sig. < 0.01 Infiltración: 521 mm/h. N=20.

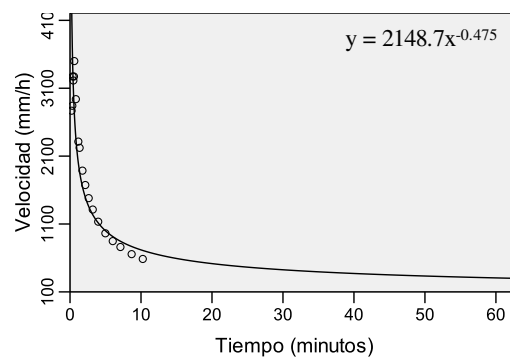


Figura A-112. Prueba VtGan_2; $R^2 = 0.91$; Sig. < 0.01 Infiltración: 307 mm/h. N=20.

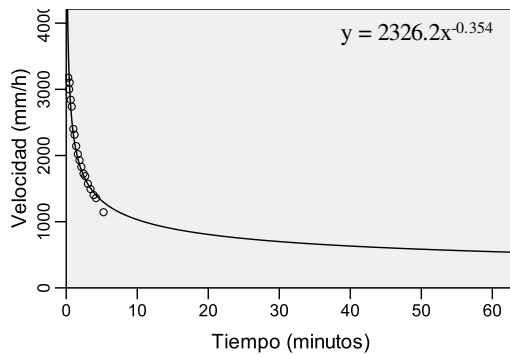


Figura A-113. Prueba VtGan_3; $R^2 = 0.97$; Sig. < 0.01 Infiltración: 546 mm/h. N=20.

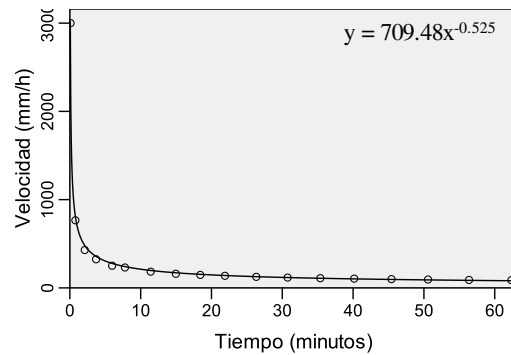


Figura A-114. Prueba VtGan_4; $R^2 = 0.99$; Sig. < 0.01 Infiltración: 83 mm/h. N=20.

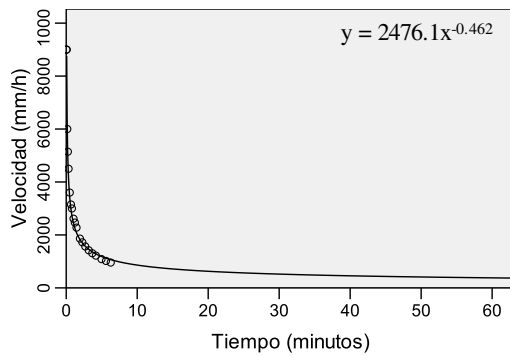


Figura A-115. Prueba VtGan_5; $R^2 = 0.98$; Sig. < 0.01 Infiltración: 373 mm/h. N=20.

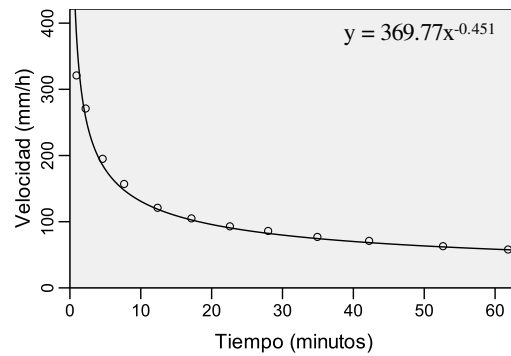


Figura A-116. Prueba VtRur_1; $R^2 = 0.99$; Sig. < 0.01 Infiltración: 58 mm/h. N=20.

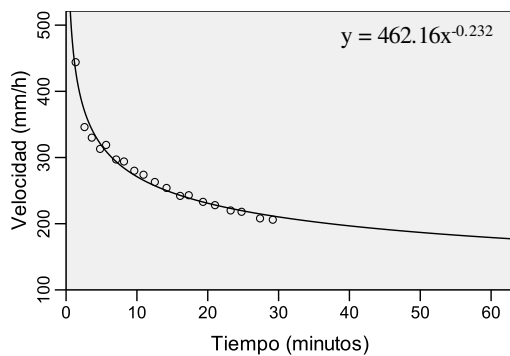


Figura A-117. Prueba VtRur_2; $R^2 = 0.98$; Sig. < 0.01 Infiltración: 179 mm/h. N=20.

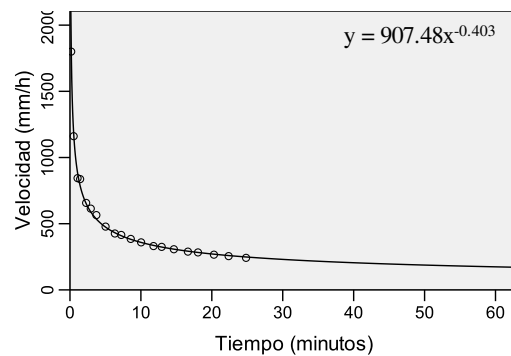


Figura A-118. Prueba VtRur_3; $R^2 = 0.99$; Sig. < 0.01 Infiltración: 174 mm/h. N=20.

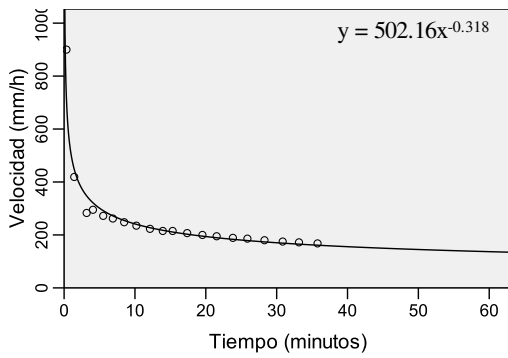


Figura A-119. Prueba VtRur_4; $R^2 = 0.95$; Sig. < 0.01 Infiltración: 137 mm/h. N=20.

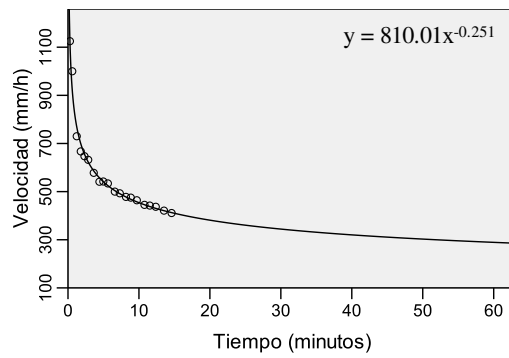


Figura A-120. Prueba VtRur_5; $R^2 = 0.99$; Sig. < 0.01 Infiltración: 290 mm/h. N=20.

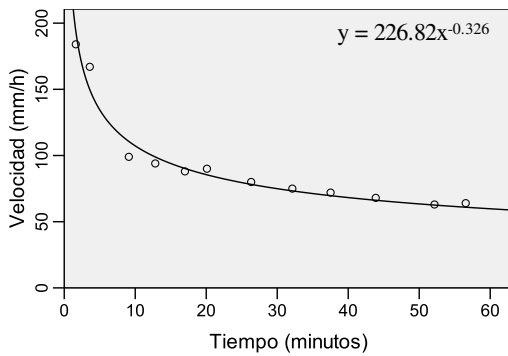


Figura A-121. Prueba VtUrb_1; $R^2 = 0.99$; Sig. < 0.01 Infiltración: 60 mm/h. N=20.

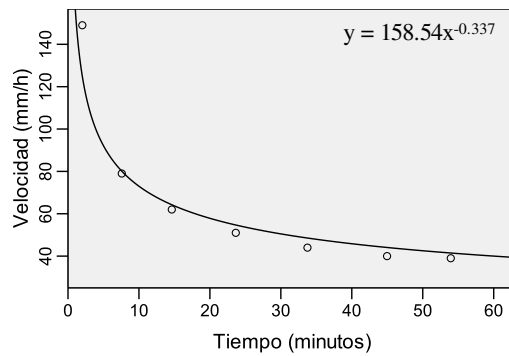


Figura A-122. Prueba VtUrb_2; $R^2 = 0.97$; Sig. < 0.01 Infiltración: 40 mm/h. N=20.

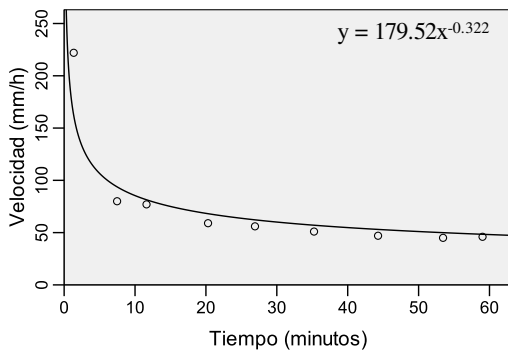


Figura A-123. Prueba VtUrb_3; $R^2 = 0.92$; Sig. < 0.01 Infiltración: 48 mm/h. N=20.

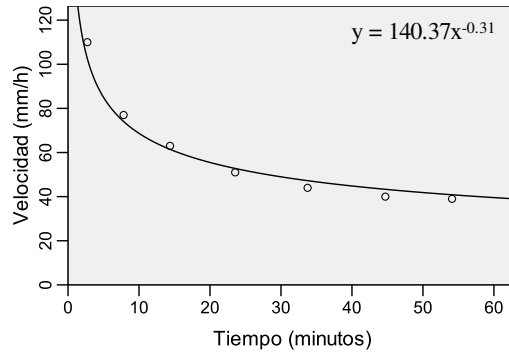


Figura A-124. Prueba VtUrb_4; $R^2 = 0.98$; Sig. < 0.01 Infiltración: 39 mm/h. N=20.

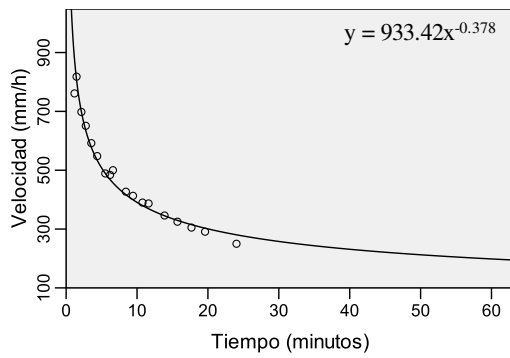


Figura A-125. Prueba VtUrb_5; $R^2 = 0.97$; Sig. < 0.01 Infiltración: 199 mm/h. N=20.

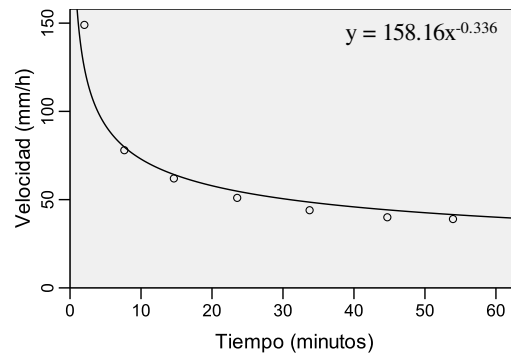


Figura A-126. Prueba XeAgri_1; $R^2 = 0.97$; Sig. < 0.01 Infiltración: 40 mm/h. N=20.

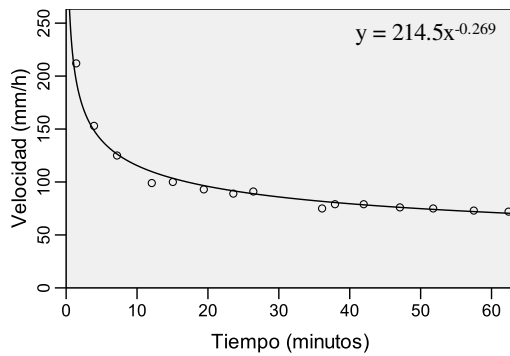


Figura A-127. Prueba XeAgri_2; $R^2 = 0.98$; Sig. 0.01 Infiltración: 71 mm/h. N=20.

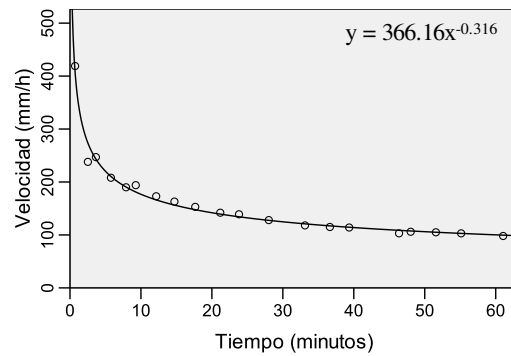


Figura A-128. Prueba XeAgri_3; $R^2 = 0.99$; Sig. < 0.01 Infiltración: 100 mm/h. N=20.

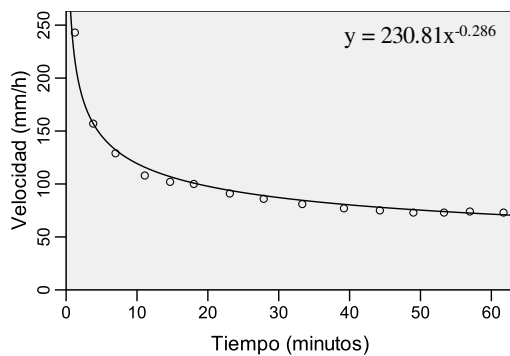


Figura A-129. Prueba XeAgri_4; $R^2 = 0.98$; Sig. < 0.01 Infiltración: 72 mm/h. N=20.

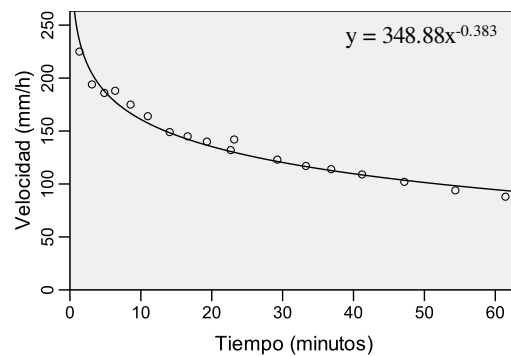


Figura A-130. Prueba XeAgri_5; $R^2 = 0.98$; Sig. < 0.01 Infiltración: 95 mm/h. N=20.

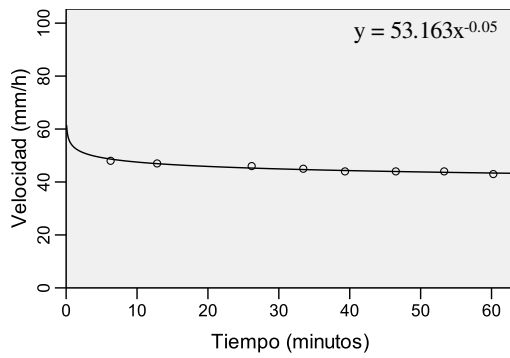


Figura A-131. Prueba XeGan_1; $R^2 = 0.98$; Sig. < 0.01 Infiltración: 43 mm/h. N=20.

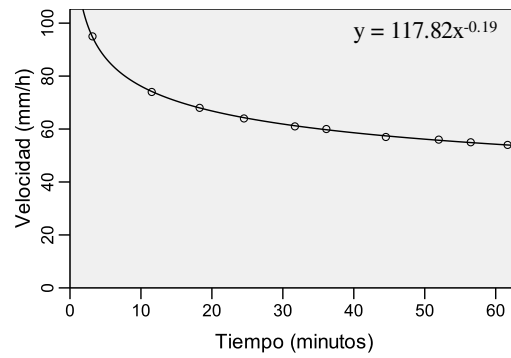


Figura A-132. Prueba XeGan_2; $R^2 = 0.99$; Sig. < 0.01 Infiltración: 54 mm/h. N=20.

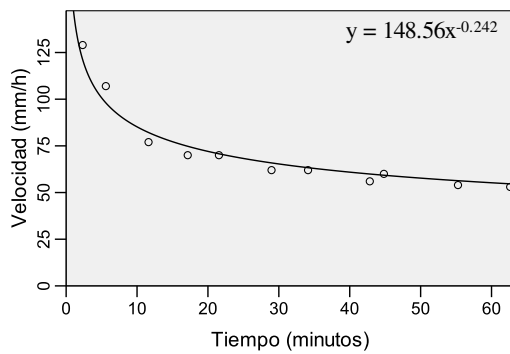


Figura A-133. Prueba XeGan_3; $R^2 = 0.97$; Sig. < 0.01 Infiltración: 55 mm/h. N=20.

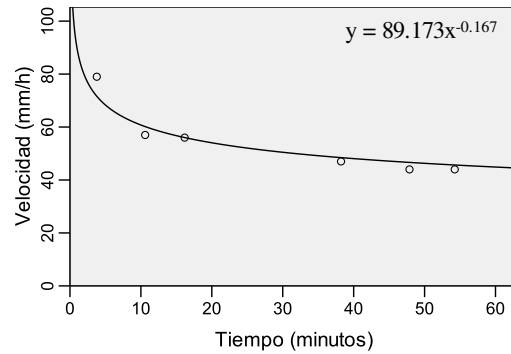


Figura A-134. Prueba XeGan_4; $R^2 = 0.92$; Sig. < 0.01 Infiltración: 45 mm/h. N=20.

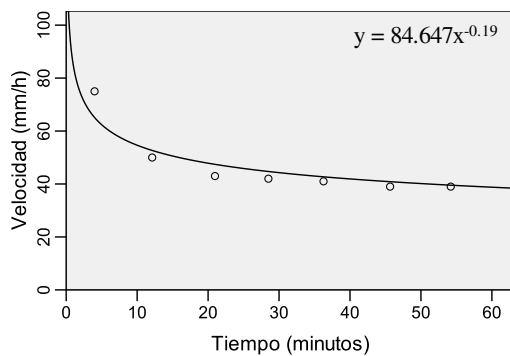


Figura A-135. Prueba XeGan_5; $R^2 = 0.93$; Sig. < 0.01 Infiltración: 39 mm/h. N=20.

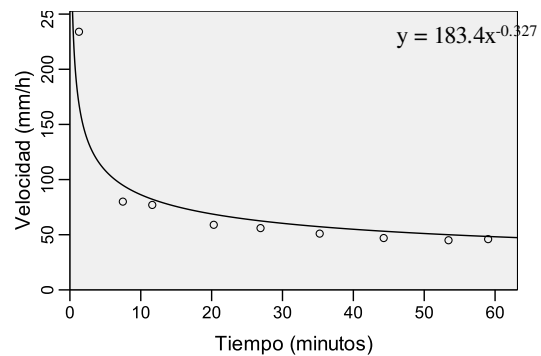


Figura A-136. Prueba XeRur_1; $R^2 = 0.91$; Sig. < 0.01 Infiltración: 48 mm/h. N=20.

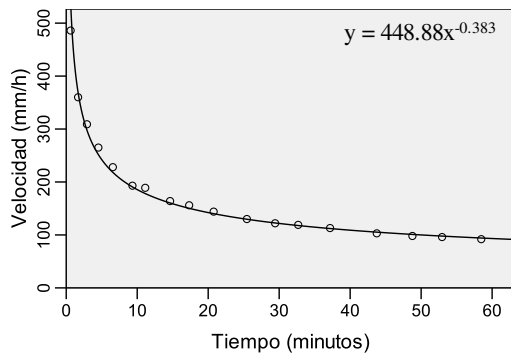


Figura A-137. Prueba XeRur_2; $R^2 = 0.99$; Sig. < 0.01 Infiltración: 94 mm/h. N=20.

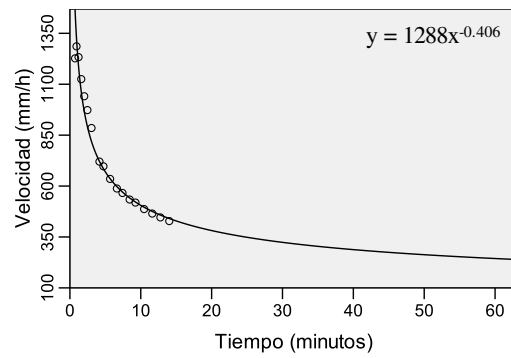


Figura A-138. Prueba XeRur_3; $R^2 = 0.98$; Sig. < 0.01 Infiltración: 244 mm/h. N=20.

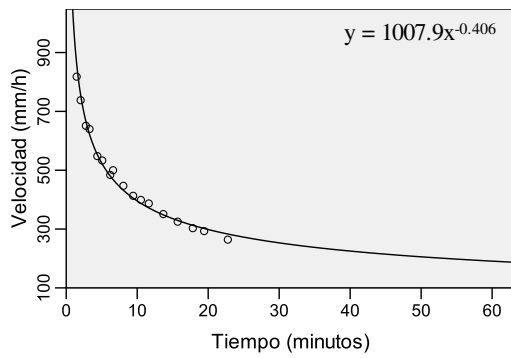


Figura A-139. Prueba XeRur_4; $R^2 = 0.99$; Sig. < 0.01 Infiltración: 191 mm/h. N=20.

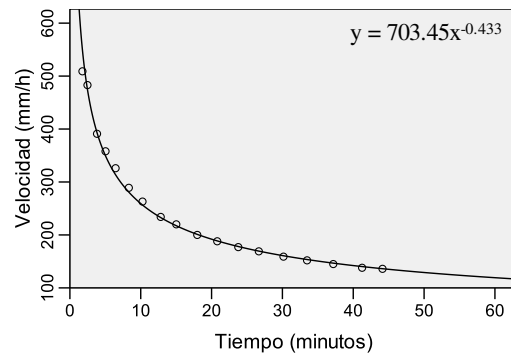


Figura A-140. Prueba XeRur_5; $R^2 = 0.99$; Sig. < 0.01 Infiltración: 119 mm/h. N=20.

A-2. Granulometría de los suelos

Las texturas encontradas en el área de estudio fueron de los tipos Franco (Fr), Franco Limoso (Fr-lim), Franco Arenoso (Fr-are), Arenoso (Are), Arcillo Arenoso (Arci-are), Franco Arciloso (Fr-arci), Franco Limo Arcilloso (Fr-lim-arci), los cuales se presenta a continuación:

Tabla A-2.1 Fracciones granulométricas de los suelos del área de estudio según el tipo y uso de suelo.

Tipo de suelo	Agrícola	Forestal	Ganadero	Rural	Urbano
Feozem	Fr	Fr-lim, Fr-are	Fr, Fr-lim	Fr, Fr-lim	
Fluvisol				Fr-lim	
Litosol	Fr, Fr-lim	Are, Fr-are	Fr, Fr-are	Fr-lim	
Luvisol	Arci, Arci-are	Arci, Fr-arci	Arci	Arci	
Regosol	Fr, Fr-are	Fr-are	Fr, Fr-are	Fr, Fr-lim	
Rendzina	Fr-lim		Fr, Fr-lim	Fr, Fr-arci	
Vertisol	Arci	Arci, Fr-arci, Arci-lim	Arci	Arci, Arci-lim	Arci, Arci-lim
Xerosol	Fr-lim-arci		Arci, Arci-lim	Arci, Fr-arci	

A-3. Pruebas de normalidad

Se realizaron pruebas de normalidad de Shapiro-Wilks en donde se observa que los datos de las variables evaluadas agrupados en tipos y usos de suelo no presentan distribuciones normales en al menos uno de sus grupos (Sig. <0.05). Esto implica la utilización de pruebas no paramétricas para el análisis del conjunto de estos grupos con el fin de estimar diferencias o similitudes estadísticas.

Tabla A-3.1. Test de Shapiro-Wilks para la variable Infiltración (mm/h).

Según: Uso de suelo		
Grupo	Estadístico W	Sig.*
Agrícola	0.74	0.000
Forestal	0.90	0.020
Ganadero	0.92	0.015
Rural	0.96	0.213
Urbano	0.66	0.003
Según: Tipo de suelo		
Grupo	Estadístico W	Sig.*
Feozem	0.69	0.000
Fluvisol	0.91	0.497
Litosol	0.68	0.000
Luvisol	0.69	0.000
Regosol	0.66	0.000
Rendzina	0.81	0.004
Vertisol	0.90	0.015
Xerosol	0.78	0.002

* La significancia menor a 0.05 indica una distribución no-normal de los datos (en gris).

Tabla A-3.2. Test de Shapiro-Wilks para la variable Humedad (%).

Según: Uso de suelo		
Grupo	Estadístico W	Sig.*
Agrícola	0.94	0.071
Forestal	0.88	0.007
Ganadero	0.96	0.227
Rural	0.93	0.015
Urbano	0.98	0.928
Según: Tipo de suelo		
Grupo	Estadístico W	Sig.*
Feozem	0.94	0.245
Fluvisol	0.93	0.614
Litosol	0.97	0.749
Luvisol	0.94	0.245
Regosol	0.95	0.311
Rendzina	0.88	0.042
Vertisol	0.95	0.265
Xerosol	0.93	0.264

* La significancia menor a 0.05 indica una distribución no-normal de los datos (en gris).

Tabla A-3.3. Test de Shapiro-Wilks para la variable Densidad (g/cm^3).

Según: Uso de suelo		
Grupo	Estadístico W	Sig.*
Agrícola	0.98	0.850
Forestal	0.87	0.004
Ganadero	0.93	0.021
Rural	0.96	0.132
Urbano	0.87	0.271
Según: Tipo de suelo		
Grupo	Estadístico W	Sig.*
Feozem	0.98	0.934
Fluvisol	0.81	0.100
Litosol	0.94	0.274
Luvisol	0.97	0.711
Regosol	0.94	0.258
Rendzina	0.89	0.063
Vertisol	0.88	0.008
Xerosol	0.88	0.046

* La significancia menor a 0.05 indica una distribución no-normal de los datos (en gris).

Tabla A-3.4. Test de Shapiro-Wilks para la variable Limo (%).

Según: Uso de suelo		
Grupo	Estadístico W	Sig.*
Agrícola	0.95	0.082
Forestal	0.82	0.000
Ganadero	0.96	0.300
Rural	0.96	0.180
Urbano	0.86	0.213
Según: Tipo de suelo		
Grupo	Estadístico W	Sig.*
Feozem	0.89	0.023
Fluvisol	0.97	0.858
Litosol	0.95	0.336
Luvisol	0.96	0.629
Regosol	0.94	0.270
Rendzina	0.92	0.179
Vertisol	0.96	0.451
Xerosol	0.95	0.482

* La significancia menor a 0.05 indica una distribución no-normal de los datos (en gris).

Tabla A-3.5. Test de Shapiro-Wilks para la variable Arena (%).

Según: Uso de suelo		
Grupo	Estadístico W	Sig.*
Agrícola	0.96	0.184
Forestal	0.91	0.034
Ganadero	0.95	0.116
Rural	0.97	0.406
Urbano	0.90	0.427
Según: Tipo de suelo		
Grupo	Estadístico W	Sig.*
Feozem	0.90	0.035
Fluvisol	0.81	0.094
Litosol	0.86	0.007
Luvisol	0.97	0.676
Regosol	0.97	0.650
Rendzina	0.93	0.242
Vertisol	0.84	0.001
Xerosol	0.76	0.001

* La significancia menor a 0.05 indica una distribución no-normal de los datos (en gris).

Tabla A3.6. Test de Shapiro-Wilks para la variable Arcilla (%).

Según: Uso de suelo		
Grupo	Estadístico W	Sig.*
Agrícola	0.93	0.024
Forestal	0.80	0.000
Ganadero	0.91	0.009
Rural	0.93	0.015
Urbano	0.85	0.194
Según: Tipo de suelo		
Grupo	Estadístico W	Sig.*
Feozem	0.88	0.020
Fluvisol	0.85	0.186
Litosol	0.92	0.085
Luvisol	0.97	0.692
Regosol	0.96	0.450
Rendzina	0.88	0.047
Vertisol	0.95	0.198
Xerosol	0.94	0.335

* La significancia menor a 0.05 indica una distribución no-normal de los datos (en gris).

A-4. Pruebas de Kruskal-Wallis

Tabla A-4.1. Pruebas de Kruskal-Wallis para la variable Infiltración (mm/h).

Uso de suelo*	n	medias	Desv. est.	Min	Max	Medias rangos	Grupos
Agrícola	35	269.29	225.20	40	1259	68.46	B
Forestal	25	1078.64	803.57	58	2423	110.56	A
Ganadero	35	266.26	186.08	39	640	68.04	B
Rural	40	179.55	77.21	48	342	55.75	B
Urbano	5	77.20	68.61	39	199	19.70	C
Tipo de suelo**	n	medias	Desv. est.	Min	Max	Medias rangos	Grupos
Feozem	20	340.35	293.76	117	1241	78.43	BC
Fluvisol	5	110.60	31.26	80	154	30.60	EF
Litosol	20	762.40	721.09	232	2360	108.68	A
Luvisol	20	202.55	182.27	43	709	52.00	DE
Regosol	20	644.75	806.83	97	2423	83.00	BC
Rendzina	15	388.87	298.95	113	1259	86.53	AB
Vertisol	25	263.24	204.09	39	679	65.34	CD
Xerosol	15	87.33	59.22	39	244	22.90	F

*Chi² =37.742, Sig. <0.000, Tratamientos=5, gl.=4, valor de t= 1.977

** Chi² =52.793, Sig. <0.000, Tratamientos= 8, gl.=7, valor de t= 1.978

Tabla A-4.2. Pruebas de Kruskal-Wallis para la variable Densidad (g/cm³).

Uso de suelo*	n	medias	Desv. est.	Min	Max	Medias rangos	Grupos
Agrícola	35	1.54	0.18	1.20	1.94	75.31	B
Forestal	25	1.33	0.25	1.04	1.89	37.26	C
Ganadero	35	1.52	0.21	1.21	1.90	69.20	B
Rural	40	1.58	0.17	1.31	1.94	81.94	B
Urbano	5	1.80	0.17	1.53	1.94	120.60	A
Tipo de suelo**	n	medias	Desv. est.	Min	Max	Medias rangos	Grupos
Feozem	20	1.46	0.16	1.09	1.74	60.35	CD
Fluvisol	5	1.77	0.10	1.68	1.94	118.80	A
Litosol	20	1.38	0.19	1.07	1.70	47.38	D
Luvisol	20	1.59	0.17	1.28	1.89	83.90	BC
Regosol	20	1.44	0.21	1.04	1.74	59.10	CD
Rendzina	15	1.38	0.14	1.20	1.57	44.83	D
Vertisol	25	1.55	0.24	1.20	1.94	74.22	BC
Xerosol	15	1.77	0.14	1.48	1.94	115.57	A

*Chi² =28.145, Sig. <0.000, Tratamientos=5, gl.=4, valor de t= 1.977

** Chi² =43.367, Sig. <0.000, Tratamientos=8, gl.=7, valor de t= 1.978

Tabla A-4.3. Pruebas de Kruskal-Wallis para la variable Humedad (%)

Uso de suelo*	n	medias	Desv. est.	Min	Max	Medias rangos	Grupos
Agrícola	35	13.93	5.18	5.10	23	66.63	A
Forestal	25	15.51	5.21	5.4	23.5	83.56	A
Ganadero	35	13.53	4.75	5	22.7	64.29	A
Rural	40	15.23	4.03	8.8	22.5	78.30	A
Urbano	5	7.44	1.62	5.4	9.5	13.40	B
Tipo de suelo**	n	medias	Desv. est.	Min	Max	Medias rangos	Grupos
Feozem	20	16.42	3.86	10.3	22.7	89.35	A
Fluvisol	5	13.98	3.64	10.1	19.7	67.60	AB
Litosol	20	12.53	4.24	5.1	20.2	56.38	B
Luvisol	20	16.92	3.94	10	22.9	92.95	A
Regosol	20	12.32	4.70	5.4	23.0	55.25	B
Rendzina	15	12.85	5.18	6.40	22.6	56.57	B
Vertisol	25	12.69	5.38	5.00	23.5	57.86	B
Xerosol	15	16.75	4.56	8.8	22.6	90.57	A

*Chi² =15.124, Sig. =0.004, Tratamientos= 5, gl. =4, valor de t= 1.977

** Chi² =23.6, Sig. =0.001, Tratamientos= 8, gl. =7, valor de t= 1.978

Tabla A-4.4. Pruebas de Kruskal-Wallis para la variable Arena (%)

Uso de suelo*	n	medias	Desv. est.	Min	Max	Medias rangos	Grupos
Agrícola	35	33.43	13.52	7.00	57	77.87	AB
Forestal	25	48.00	25.58	8	85	94.06	A
Ganadero	35	30.14	11.57	10	51	69.66	BC
Rural	40	26.73	10.81	5	47	57.95	C
Urbano	5	7.60	2.70	5	12	7.40	D
Tipo de suelo**	n	medias	Desv. est.	Min	Max	Medias rangos	Grupos
Feozem	20	31.50	10.72	15	59	69.48	B
Fluvisol	5	15.80	9.04	5	24	25.00	C
Litosol	20	49.55	18.61	23	85	109.85	A
Luvisol	20	27.45	9.44	13	45	60.00	B
Regosol	20	50.80	14.96	26	78	113.58	A
Rendzina	15	33.00	6.00	20	42	78.50	B
Vertisol	25	19.56	11.02	5	34	37.52	C
Xerosol	15	18.87	11.47	8	40	38.10	C

*Chi² =25.556, Sig. <0.000, Tratamientos= 5, gl. =4, valor de t= 1.977

** Chi² =75.767, Sig. <0.000, Tratamientos= 8, gl. =7, valor de t= 1.978

Tabla A-4.5. Pruebas de Kruskal-Wallis para la variable Limo (%)

Uso de suelo*	n	medias	Desv. est.	Min	Max	Medias rangos	Grupos
Agrícola	35	37.51	15.33	10	62	73.61	A
Forestal	25	30.80	19.83	8	79	48.02	B
Ganadero	35	36.37	9.38	20	55	69.30	A
Rural	40	41.88	13.44	15	67	85.85	A
Urbano	5	29.00	7.97	22	42	46.70	B
Tipo de suelo**	n	medias	Desv. est.	Min	Max	Medias rangos	Grupos
Feozem	20	50.85	13.44	35	79	105.68	A
Fluvisol	5	40.20	3.19	36	44	83.50	B
Litosol	20	37.70	18.18	8	67	73.45	B
Luvisol	20	22.50	5.82	12	34	27.70	D
Regosol	20	33.50	10.97	16	55	60.08	BC
Rendzina	15	49.67	4.70	40	55	110.57	A
Vertisol	25	29.36	10.63	10	47	49.44	C
Xerosol	15	40.33	11.64	21	58	81.33	B

*Chi² =15.38, Sig. =0.004, Tratamientos= 5, gl. =4, valor de t= 1.977

** Chi² =61.753, Sig. <0.000, Tratamientos= 8, gl. =7, valor de t= 1.978

Tabla A-4.6. Pruebas de Kruskal-Wallis para la variable Arcilla (%)

Uso de suelo*	n	medias	Desv. est.	Min	Max	Medias rangos	Grupos
Agrícola	35	29.06	18.45	6	73	67.01	B
Forestal	25	21.20	18.35	3	58	46.44	C
Ganadero	35	33.49	15.46	11	62	78.89	B
Rural	40	31.40	16.38	4	56	73.34	B
Urbano	5	63.40	7.77	51	70	133.80	A
Tipo de suelo**	n	medias	Desv. est.	Min	Max	Medias rangos	Grupos
Feozem	20	17.65	8.71	4	28	42.95	C
Fluvisol	5	44.00	6.60	38	53	100.10	AB
Litosol	20	12.75	7.30	3	27	30.03	D
Luvisol	20	50.05	7.01	35	62	113.93	A
Regosol	20	15.70	6.73	5	28	38.38	CD
Rendzina	15	17.33	9.57	6	33	41.60	CD
Vertisol	25	51.08	10.82	34	73	113.42	A
Xerosol	15	40.80	6.77	32	54	93.63	B

*Chi² =22.94, Sig. <0.000, Tratamientos= 5, gl. =4, valor de t= 1.977

** Chi² =107.838 Sig. <0.000, Tratamientos= 8, gl. =7, valor de t= 1.9782