

**CARACTERIZACIÓN DE PARÁMETROS Y ANÁLISIS DE LA INFILTRACIÓN DEL
SUELO EN LA UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO SEDE USME**

DUVAN ARLEY GUANUMEN CASTILLO

**UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y CIVIL
INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.**

2020

**CARACTERIZACIÓN DE PARÁMETROS Y ANÁLISIS DE LA INFILTRACIÓN DEL
SUELO EN LA UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO SEDE USME**

DUVAN ARLEY GUANUMEN CASTILLO

PROYECTO BASADO EN LA CATEGORÍA DE MONOGRAFÍA

DIRECTORA:

ING. ALEXANDRA MORALES

UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y CIVIL

INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ D.C

2020

NOTA DE ACEPTACIÓN

FIRMA DEL JURADO 1

FIRMA DEL JURADO 2

BOGOTÁ D.C, JUNIO DE 2020

Dedicatoria

Quiero dedicarle este logro primordialmente a Dios, quien es el que me ha brindado la vida y la salud para conseguir esta, entre otras muchas metas que me he propuesto durante mi vida. Luego quiero dedicárselo a mi familia, principalmente a mi padre Jhon Fredy Guanumen Corregidor y a mi madre Ana Castillo León, que sé lo orgullosos que se sienten de mí, por estar a un paso de terminar la carrera profesional como ingeniero civil. Y finalmente, dedicarle parte de mi éxito a todas aquellas personas que han aportado algo en mi para alcanzar este objetivo.

Agradecimientos

Agradezco profundamente a mis padres Jhon Fredy Guanumen Corregidor y Ana Castillo León que con su apoyo y ayuda fue posible la culminación de este grandioso camino, lleno de experiencias y conocimientos que marcaron mi vida como persona y profesional. También, me encuentro agradecido con mi tutora de tesis Alexandra Morales y profesores que fueron de vital soporte durante mi carrera de ingeniería civil, y, por consiguiente, a la Universidad Antonio Nariño por permitirme formarme como un ciudadano idóneo entendido en el área. Y así mismo, me brindaron la oportunidad de conocer colegas y compañeros de excelente calidad durante el proceso.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|-----------|
| Dedicatoria | 4 |
| Agradecimientos..... | 5 |
| 1. Resumen | 13 |
| 2. Abstract | 14 |
| 3. Introducción..... | 15 |
| 4. Objetivos..... | 16 |
| 4.1. Objetivo general | 16 |
| 4.2. Objetivos Específicos..... | 16 |
| 5. Marco conceptual | 17 |
| 5.1. Infiltración y sus parámetros | 17 |
| 5.1.1. Porosidad:..... | 17 |
| 5.1.2. Porosidad efectiva: | 17 |
| 5.1.3. Capilaridad: | 18 |
| 5.1.4. Conductividad eléctrica:..... | 19 |
| 5.1.5. Contenido de humedad:..... | 19 |
| 5.1.6. Tasa de infiltración:..... | 19 |
| 5.2. Importancia de la infiltración | 20 |
| 5.2.1. Acuíferos | 20 |
| 5.3. ¿Cómo se mide la infiltración?..... | 22 |

| | | |
|-------------|--|-----------|
| 5.3.1. | Métodos directos | 22 |
| 5.3.1.1. | Método del cilindro infiltrómetro..... | 22 |
| 5.3.1.2. | Método del surco infiltrómetro | 22 |
| 5.3.1.3. | Simulaciones de lluvia: | 22 |
| 5.3.2. | Método indirecto | 22 |
| 5.4. | Entidades que brindan información sobre las características del suelo | 24 |
| 5.4.2. | SGC (Servicio Geológico Colombiano)..... | 24 |
| 5.5. | Herramientas o programas necesarios para el proyecto | 25 |
| 5.5.1. | SoilGrids 3D:..... | 25 |
| 5.5.2. | QGIS: | 26 |
| 6. | Estado del conocimiento | 27 |
| 6.1. | Descripción de los artículos más relevantes con el tema propuesto | 31 |
| 6.1.2. | Parámetros de respuesta para la caracterización de la infiltración..... | 34 |
| 6.1.3. | Modelos de infiltración Green-Ampt para condiciones de campo variadas: una nueva visita | 36 |
| 6.1.4. | Observación y modelado en el proceso de infiltración irregular del agua del suelo púrpura. 38 | |
| 6.1.5. | Estimación de parámetros para el modelo de infiltración de Kostiakov-Lewis a partir de las propiedades físicas del suelo. | 40 |
| 6.1.6. | Efecto de los cambios en la tasa de infiltración en los suelos urbanos en el proceso de escorrentía de aguas pluviales. | 41 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 6.1.7. | Estimación de los parámetros de la ecuación de infiltración Green–Ampt a partir de datos de simulación de lluvia: por qué más simple es mejor. | 44 |
| 6.1.8. | Aplicación de hoja de cálculo para estimar parámetros de infiltración. | 46 |
| 6.1.9. | Modelado de la permeabilidad del suelo utilizando diferentes algoritmos basados en datos basados en las propiedades físicas del suelo. | 48 |
| 6.1.10. | Un estudio integrado de tomografía de resistividad eléctrica y método de infiltración para descifrar las características y potencialidades de la zona no saturada en roca cristalina. | 50 |
| 7. | Metodología..... | 52 |
| 8. | Elaboración del trabajo y resultados..... | 53 |
| 8.1. | Delimitación de la zona | 53 |
| 8.2. | Obtención de características del suelo..... | 56 |
| 8.3. | Selección de parámetros de infiltración y uso de la ecuación Green – Ampt | 63 |
| 9. | Conclusiones..... | 82 |
| 10. | Recomendaciones | 84 |
| 11. | Anexos | 84 |
| 12. | Referencias | 85 |

Listado de figuras

| | |
|--|----|
| <i>Figura 1 Porosidad del suelo.</i> | 17 |
| <i>Figura 2 Porosidad efectiva en los suelos.</i> | 18 |
| <i>Figura 3 Efecto de la capilaridad en el suelo.</i> | 18 |
| <i>Figura 4 Gráfica de conductividad eléctrica en el suelo según la textura del suelo.</i> | 19 |
| <i>Figura 5 Acuífero presentado en vista de perfil.</i> | 20 |
| <i>Figura 6 Tipos de acuíferos.</i> | 21 |
| <i>Figura 7 infiltrómetro de doble anillo.</i> | 22 |
| <i>Figura 8 Esquema del modelo Green-Ampt.</i> | 23 |
| <i>Figura 9 Ecuación de Horton.</i> | 24 |
| <i>Figura 10 Fragmento visual del programa online SoilGrids 3D.</i> | 26 |
| <i>Figura 11 Fragmento visual del software QGIS.</i> | 27 |
| <i>Figura 12 Análisis de documentos relacionados con la infiltración por año.</i> | 28 |
| <i>Figura 13 Análisis de documentos relacionados con la infiltración por país.</i> | 28 |
| <i>Figura 14 Análisis de documentos relacionados con la infiltración por área temática.</i> | 29 |
| <i>Figura 15 Índice H de algunas revistas citadas.</i> | 31 |
| <i>Figura 16 Fórmula Green-Ampt de la tasa de infiltración.</i> | 32 |
| <i>Figura 17 Parámetros Green-Ampt según clases de textura del suelo y sus respectivos horizontes.</i> | 33 |
| <i>Figura 18 Efecto de las condiciones climáticas en el perfil de presión de poros del agua cerca de la superficie del suelo de una pendiente.</i> | 34 |
| <i>Figura 19 Series de valores en el estudio paramétrico.</i> | 35 |
| <i>Figura 20 Ecuación diferencial parcial del flujo de agua transitorio.</i> | 35 |
| <i>Figura 21 Suelo homogéneo en diferentes tipos de material.</i> | 36 |

| | |
|--|----|
| <i>Figura 22 Perfil de infiltración para el modelo Green-Ampt.</i> | 37 |
| <i>Figura 23 Suelo heterogéneo.</i> | 38 |
| <i>Figura 24 Dispositivo de infiltración de agua del suelo.</i> | 38 |
| <i>Figura 25 Diseño de (a) perfil de suelo triangular y (b) triangular invertido para suelo homogéneo.</i> | 39 |
| <i>Figura 26 Diseño de infiltración del suelo en (a) tipo C / F y (b) perfil triangular tipo F / C para suelos heterogéneos.</i> | 39 |
| <i>Figura 27 Descripción general del área de estudio y diseño experimental.</i> | 40 |
| <i>Figura 28 Selección de parámetros del modelo de gestión de aguas pluviales.</i> | 42 |
| <i>Figura 29 Descripción general del área estudiada.</i> | 43 |
| <i>Figura 30 Porcentajes de costra en el suelo del 10% (a), 30% (b), 70% (c) y 100% (d).</i> | 44 |
| <i>Figura 31 Rango de valores de las características medidas de suelo / superficie y lluvia durante los experimentos de primavera / verano e invierno.</i> | 45 |
| <i>Figura 32 Comparación de parámetros y rendimiento del método optimización (OM) y convencional gráfico (GM).</i> | 47 |
| <i>Figura 33 Curvas de infiltración típicas obtenidas por optimización (OM) y métodos gráficos (GM).</i> | 48 |
| <i>Figura 34 Diagrama de flujo del desarrollo del modelo.</i> | 50 |
| <i>Figura 35 Sección invertida ERT en uno de los sitios estudiados que exhibe flujo de agua a través de zonas más débiles.</i> | 51 |
| <i>Figura 36 Ubicación de la Universidad Antonio Nariño sede Usme.</i> | 54 |
| <i>Figura 37 Vista de toda la sede de la Universidad Antonio Nariño.</i> | 55 |
| <i>Figura 38 Zona de la sede de la universidad a tener en cuenta por sus antiguos análisis.</i> | 55 |
| <i>Figura 39 Vista previa de la sede Usme de la universidad en SoilGrids 3D.</i> | 56 |

| | |
|--|-----------|
| <i>Figura 40 Análisis del suelo a una profundidad de 0 cm.....</i> | <i>57</i> |
| <i>Figura 41 Análisis del suelo a una profundidad de 30 cm.....</i> | <i>58</i> |
| <i>Figura 42 Análisis del suelo a una profundidad de 60 cm.....</i> | <i>59</i> |
| <i>Figura 43 Análisis del suelo a una profundidad de 1 metro.....</i> | <i>60</i> |
| <i>Figura 44 Análisis del suelo a una profundidad de 2 metros.</i> | <i>61</i> |
| <i>Figura 45 Mapa Qgis de la zona de estudio con la infomación de la textura de suelo</i> | <i>62</i> |
| <i>Figura 46 Ecuación Green Ampt despejada para hallar la infiltración acumulada.</i> | <i>64</i> |
| <i>Figura 47 Fórmula para conseguir la variación de la humedad.....</i> | <i>64</i> |
| <i>Figura 48 Fórmula para encontrar la saturación efectiva.....</i> | <i>64</i> |
| <i>Figura 49 Fórmula para adquirir el contenido residual de humedad.....</i> | <i>64</i> |
| <i>Figura 50 Fórmula Green-Ampt de la tasa de infiltración.....</i> | <i>65</i> |
| <i>Figura 51 Uso del programa modelo de infiltración Green-Ampt con datos de profundidad a 0 cm.</i> <i>.....</i> | <i>76</i> |
| <i>Figura 52 Uso del programa modelo de infiltración Green-Ampt con datos de profundidad a 30</i> <i>cm.....</i> | <i>77</i> |
| <i>Figura 53 Uso del programa modelo de infiltración Green-Ampt con datos de profundidad a 60</i> <i>cm.....</i> | <i>78</i> |
| <i>Figura 54 Uso del programa modelo de infiltración Green-Ampt con datos de profundidad a 100</i> <i>cm.....</i> | <i>79</i> |
| <i>Figura 55 Uso del programa modelo de infiltración Green-Ampt con datos de profundidad a 200</i> <i>cm.....</i> | <i>80</i> |

Tabla de tablas

| | |
|--|-----------|
| <i>Tabla 1 Documentos científicos encontrados por revistas en relación con la infiltración.....</i> | <i>29</i> |
| <i>Tabla 2 Documentos seleccionados por su notorio impacto en relación con la problemática propuesta.</i> | <i>30</i> |
| <i>Tabla 3 Resultados teóricos de los parámetros de infiltración.....</i> | <i>75</i> |
| <i>Tabla 4 Resultados generados por el programa de los parámetros de infiltración.....</i> | <i>80</i> |
| <i>Tabla 5 Parámetros de infiltración obtenidos.....</i> | <i>81</i> |

1. Resumen

En el presente documento se realizó una estimación de parámetros de infiltración en el suelo de la universidad Antonio Nariño, específicamente de la sede Usme, a partir de bases de datos como el IGAC y/o recopilación de información relevante encontrada por medio de investigaciones de diferentes autores. Una vez adquiridos los datos base, se procedió con la implementación de la ecuación de Green Ampt quien fué la encargada de brindar los resultados de los factores de embebimiento. Esto con la intención de que la institución educativa conozca el perfil estratigráfico en función de la infiltración, su tasa y la precipitación efectiva; además de las características como la porosidad, la capilaridad, la conductividad eléctrica y así mismo, hallar una operatividad oportuna dependiendo de los nombrados indicadores de agua. Ya que puede ser una posible alternativa para futuras investigaciones, modelaciones y hasta construcciones de proyectos que beneficien la comunidad Nariñense y de la localidad implicada.

Palabras claves

Infiltración, perfil estratigráfico, porosidad, Capilaridad, IGAC, conductividad eléctrica, tasa de infiltración, precipitación efectiva.

2. Abstract

In this document, a specification of infiltration parameters in the soil of the Antonio Nariño University, specifically of the Usme headquarters, was made from databases such as the IGAC and / or compilation of relevant information found through investigations of different authors. Once the base data was acquired, it was processed with the implementation of the Green Ampt equation who was the delivery to deliver the results of the factors of imbibition. This with the intention that the educational institution knows the stratigraphic profile based on the infiltration, its rate and the effective resolution; in addition to the characteristics such as porosity, capillarity, electrical conductivity and, likewise, finding a specific timely operation of the named water indicators. Since it can be a possible alternative for future research, modeling and construction of projects that benefit the Nariñense community and the locality involved.

Keywords

Infiltration, stratigraphic profile, porosity, capillarity, IGAC, electrical conductivity, infiltration rate, effective precipitation.

3. Introducción

El fenómeno de infiltración de agua en el suelo es una sucesión compleja que se forma de manera natural gracias al ciclo hidrológico en la Tierra; este fenómeno se explica como el ingreso del fluido al terreno a través de la superficie hacia el subsuelo, de forma vertical, horizontal y tridimensional, que, por consiguiente, su importancia radica en el control de predicción de ingreso de agua a determinados tiempos, lo que permite un aprovechable manejo de la tierra. (Sepor, 2017).

Es por esto que, en este trabajo de grado se buscó establecer los parámetros de infiltración basados en la recopilación de información existente, e introducir los datos de entrada en un modelo matemático para medir el porcentaje de retención de agua en el suelo de la sede Usme de la universidad Antonio Nariño; y de esta manera, encontrar una adecuada funcionalidad, ya que existen posibles enfoques como construcciones de estructuras de recolección del recurso subterráneo, aprovechamiento del probable acuífero y/o hasta formar edificaciones con fines de vivienda o servicios.

4. Objetivos

4.1. Objetivo general

Estimar parámetros de infiltración del suelo en la sede Usme de la Universidad Antonio Nariño, a través de información de entidades que tengan relación con el tema y/o autores que hayan realizado trabajos de campo enlazados a la temática, para así, colocarlos a disposición como iniciativa de proyecto a fines.

4.2. Objetivos Específicos

- ✓ Considerar un robusto estado del conocimiento con la intención de complementar la metodología adecuada para la obtención de los factores de infiltración.
- ✓ Localizar y caracterizar la zona puntual de trabajo y plasmarlo en el documento.
- ✓ Analizar los datos informativos existentes que se tienen de este territorio e implementarlos a un método teórico que brinde los indicadores buscados.
- ✓ Sintetizar los resultados y las conclusiones a manera de beneficios e importancia.

5. Marco conceptual

5.1. Infiltración y sus parámetros

La infiltración es un proceso natural que ocurre cuando el agua atraviesa la superficie del terreno y se desplaza hasta sus mantos inferiores. Para el análisis de este fenómeno en el ciclo hidrológico se debe tener en cuenta una relación entre la precipitación y el escurrimiento, además de los componentes que enlazan con este producto como lo es la porosidad, porosidad efectiva, capilaridad y la conductividad eléctrica (Rodríguez B. , 2013). A continuación, se presentan los parámetros a tratar y el enlace que tiene cada uno con el tema central:

5.1.1. Porosidad: Es una manifestación en un terreno que representa el porcentaje de volumen del suelo que no se encuentra ocupado por sólidos. Esto quiere decir, espacios en los que se presenta aire, gases y agua, teniendo este una estrecha relación con la infiltración ya que dependiendo de la proporción de la porosidad evitará o contribuirá un traspaso de agua considerable. (FAO, s.f.).

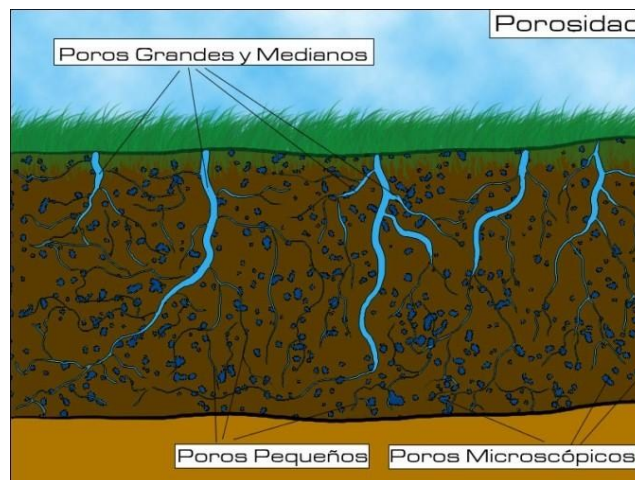


Figura 1 Porosidad del suelo.

Fuente: Extraída de (Quiroga, 2018).

5.1.2. Porosidad efectiva: A diferencia del tema comentado anteriormente, la porosidad excluye los poros aislados completamente y el volumen de estos ocupado por agua que es adsorbida ya sea por los minerales de arcilla u otros que se pueden presentar en el terreno (Oilfield

Glossary, s.f.). De igual manera, aunque este no incluya la porosidad por completo sigue siendo un motivo claro del desarrollo de la infiltración.

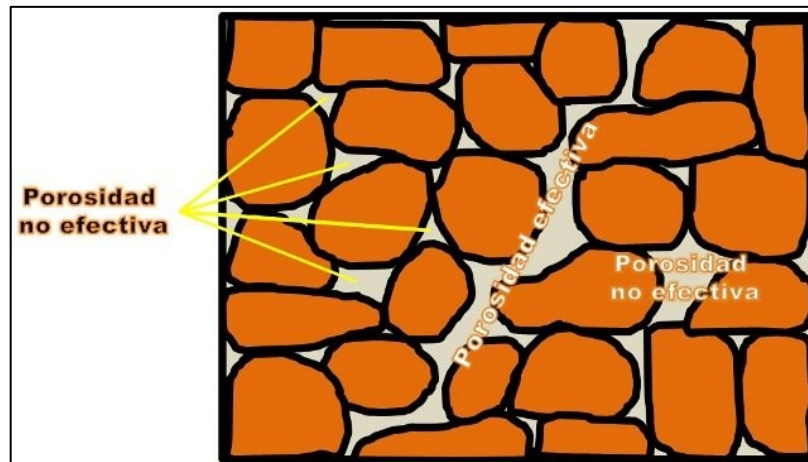


Figura 2 Porosidad efectiva en los suelos.

Fuente: Extraída de (Ennyta, 2018).

5.1.3. Capilaridad: Es un proceso que se genera por la cohesión de partículas de agua y la adhesión del mismo líquido con el terreno en el que se vea involucrado. Este se podría decir que es el efecto inverso al movimiento de la gravedad (González, 2012). Este impacto es fundamental en la filtración ya que al realizar un movimiento ascendente a partir de su nivel freático permite que la infiltración se mantenga no solo en cotas profundas, sino que también se puede aparecer en cotas superficiales.

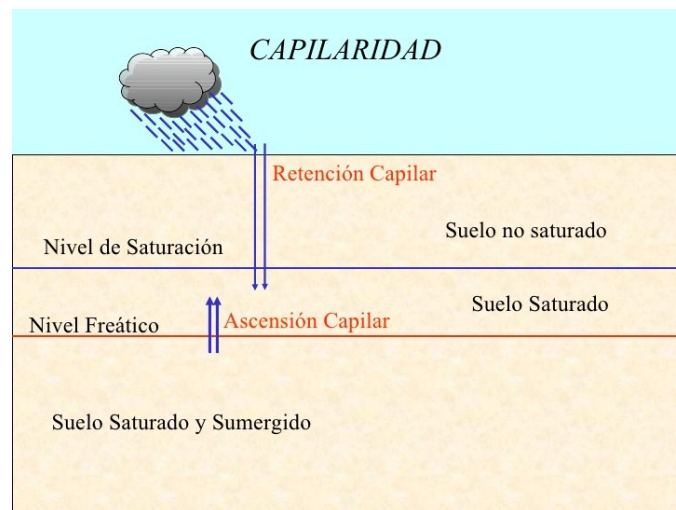


Figura 3 Efecto de la capilaridad en el suelo.

Fuente: Extraída de (Edafología U.C.A, 2009).

5.1.4. Conductividad eléctrica: Es la capacidad de la materia para permitir el paso de corriente eléctrica por medio de sus respectivas partículas. En el caso del suelo, este parámetro varía de acuerdo con la cantidad de sales que se presenten en este y de la cantidad de agua que se obtenga dentro del terreno. Es por esto que, el parámetro de infiltración es inversamente proporcional a este; Entre más se halle agua en el terreno menor será le valor de conductividad eléctrica debido a un “lavado de sales” que realiza el líquido (Raffino, 2019).

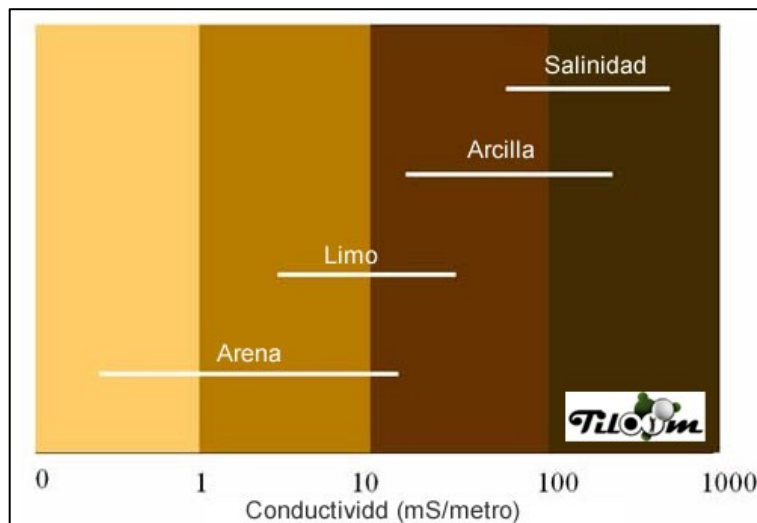


Figura 4 Gráfica de conductividad eléctrica en el suelo según la textura del suelo.

Fuente: Extraída de (Tiloom, n.f.).

5.1.5. Contenido de humedad: Es la relación que hay entre el peso del fluido contenido es una muestra de suelo natural y el mismo, pero después de haberse secado en un horno que supere los 100° C. Siendo este una característica fundamental ya que explica el comportamiento del terreno. Este se representa en porcentaje. (Caballero, s.f.).

5.1.6. Tasa de infiltración: Es una medida a la cual el terreno es apto de absorber la lluvia. Esta variable es inversamente proporcional con la saturación del suelo y se encuentra estrechamente relacionada con la conductividad hidráulica saturada del suelo cercano a la superficie. La medida universal está en mm/hora. (Pérez, s.f.).

5.2. Importancia de la infiltración

El interés de la infiltración de agua en el suelo para la ingeniería civil radica en la capacidad de sustentabilidad del terreno y que tanto riesgo de erosión o de inundación se puede detectar en esta superficie. Además de la posibilidad de encontrar fuentes de agua subterráneas como lo son los acuíferos (Rodríguez & Bernal, s.f.).

También es un recurso indispensable porque provee su uso a casi todas las plantas que se encuentran en la superficie, al igual que algunos de los animales y humanos. (Nanopdf, 2018)

Ya hablando de una interdisciplinariedad, para la ingeniería agrónoma ayudaría a predecir los tiempos de riego en el suelo para satisfacer las necesidades de un cultivo o encontrar la zona adecuada para la implementación de este (Sepor, 2017).

5.2.1. Acuíferos: Es un perfil de suelo poroso o volumen subterráneo de roca que almacena agua en donde su “esqueleto” se conforma por una estructura independiente y estable debido a la falta de presión entre el terreno y el líquido, siendo este, consecuencia del proceso de infiltración. (Sociedad Geográfica de Lima, 2011).

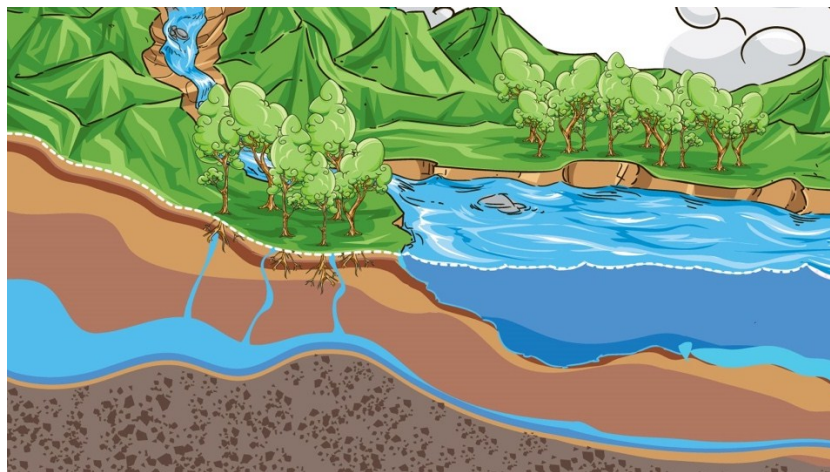


Figura 5 Acuífero presentado en vista de perfil.

Fuente: Extraída de (Ministerio de Ambiente, 2020).

Estos elementos corresponden aproximadamente al 30% del caudal de superficie y se pueden clasificar de la siguiente manera:

5.2.1.1. Acuíferos libres: Este se denomina cuando el agua almacenada que se halla en contacto con el ambiente gracias a los poros o fisuras de una roca. (Martínez Alfaro, Martínez Santos, & Castaño Castaño, 2005).

5.2.1.2. Acuíferos confinados: Cuando el agua se encuentra aislada de la atmósfera debido al material impermeable y se encuentra saturado en todos sus puntos a una presión mayor que la atmosférica se denomina un acuífero confinado. (Martínez Alfaro, Martínez Santos, & Castaño Castaño, 2005).

5.2.1.3. Acuíferos semiconfinados: En el caso de que el terreno permita un considerable flujo de agua hacia el exterior o hacia el interior se denomina acuífero semiconfinado. (Martínez Alfaro, Martínez Santos, & Castaño Castaño, 2005).

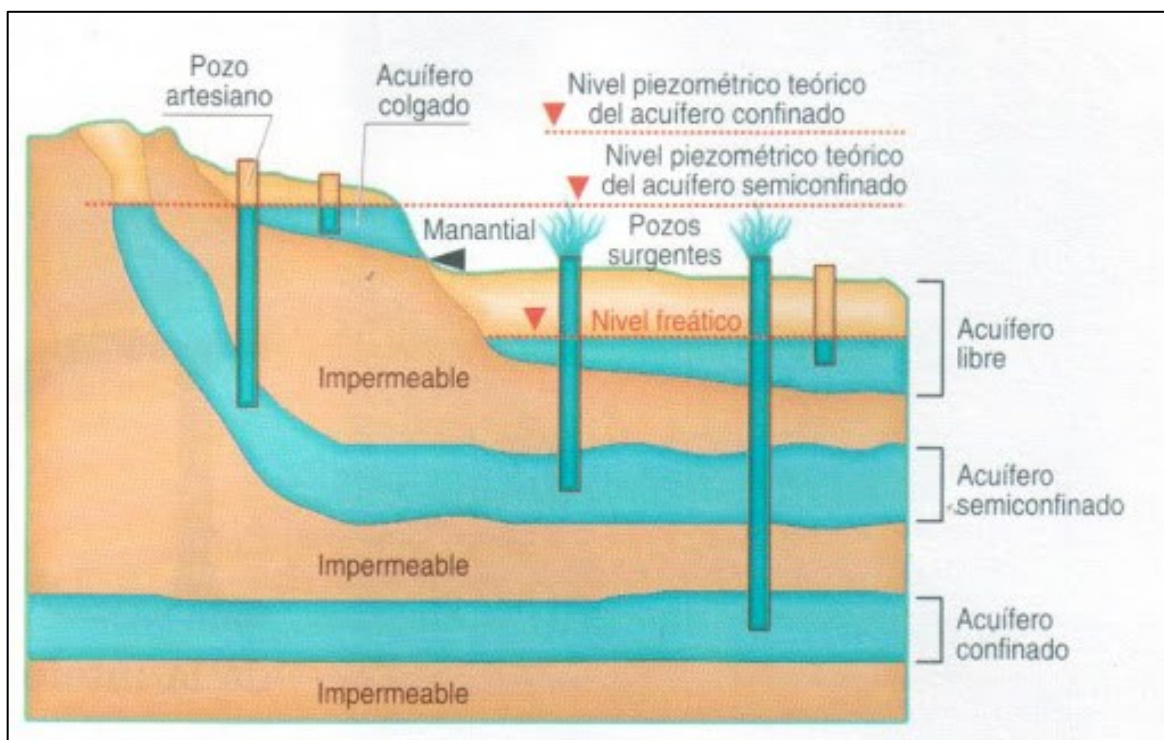


Figura 6 Tipos de acuíferos.

Fuente: Extraída de (Gonzalo Tejero, n.f.).

5.3. ¿Cómo se mide la infiltración?

La infiltración tiene métodos directos e indirectos para medirla, algunos de los métodos se presentan a continuación:

5.3.1. Métodos directos

5.3.1.1. Método del cilindro infiltrómetro: Es una prueba in situ en donde se utilizan dos anillos concéntricos. En cada uno de estos se les agrega agua para luego medir como varía la altura del líquido entre los dos anillos. Con esto obtendremos de manera experimental y teórica (ajustándolo a un modelo matemático) la caracterización de la velocidad de infiltración del lugar y la cantidad acumulada (Sepor, 2017).



Figura 7 infiltrómetro de doble anillo.

Fuente: Extraída de (Universidad Politécnica de Valencia, 2016.).

5.3.1.2. Método del surco infiltrómetro: Es una prueba de campo en el cual se realizan 3 surcos de riego y se mide el caudal entrante y saliente de la zanja central durante el tiempo determinado de la prueba. Como consecuencia se conseguirán los mismos resultados comentados del método anterior (Sepor, 2017).

5.3.1.3. Simulaciones de lluvia: La simulación de lluvia es la técnica de atribuir agua a terrenos de manera experimental de una manera similar a la precipitación natural o común; es una herramienta que ha sido usada a través de los años en estudios de erosión, infiltración y escurrimiento. (Sánchez Cohen & Asseline, 1997).

5.3.2. Método indirecto

5.3.2.1. Medida indirecta: Para los casos en donde se presente una cuenca perfectamente controlada, se puede determinar la capacidad de infiltración por medio de datos de precipitación, evaporación y escorrentía. (Universidad Nacional del Nordeste, s.f.).

5.3.2.2. Modelo de infiltración Green-Ampt: Es un modelo físico que parte de soluciones analíticas que tienen soluciones exactas.

Donde se supone que el frente mojado está ligado a un cambio brusco que desune el manto inferior del terreno con la humedad θ_i de la parte alta del suelo; con capacidad de humedad $\theta_0 = n$, donde n representa la porosidad. Además, la cara mojada ha ingresado hasta la profundidad un interior $L(t)$; y en el exterior, el terreno se encuentra regado con una superficie independiente en una altura igual a h_0 . (Ruiz Romera & Martínez Santos, s.f.).

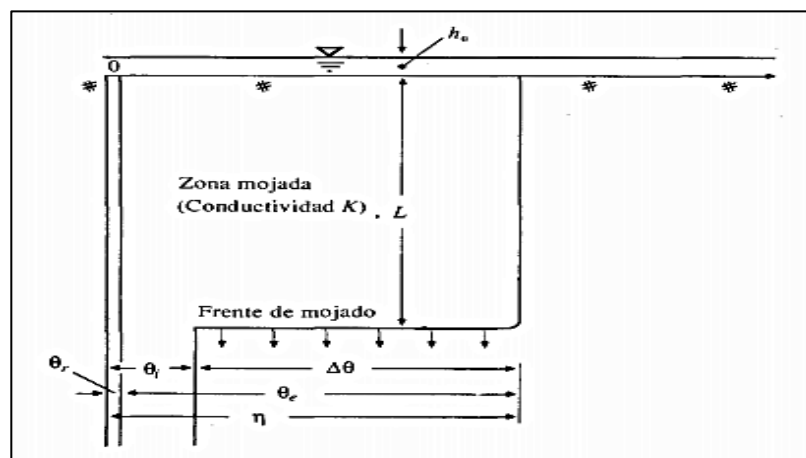


Figura 8 Esquema del modelo Green-Ampt.

Fuente: Extraída de (Chow, 1994).

5.3.2.3. Ecuación Horton: Fue desarrollada por Horton en el año 1939, donde partiendo de experiencias en el área de trabajo, estauró, para un terreno sujeto a una lluvia con magnitud siempre mayor a la suficiencia de infiltración de agua, un enlace empírico para representar la caída de la infiltración con el tiempo (Universidad de Piura, s.f.). Esta puede ser representada de la siguiente manera:

$$I_t = I_b + (I_i - I_b) e^{-k t}$$

Figura 9 Ecuación de Horton.

Fuente: Extraída de (Universidad de Piura, s.f.).

Teniendo en cuenta que:

T es el tiempo pasado que transcurre a partir de la saturación superficial del terreno

k es la constante de decadencia [T-1]

It se denomina como la tasa de infiltración en un tiempo t

Ii como la tasa inicial de infiltración (t = 0)

Ib es la tasa de infiltración mínima

5.4. Entidades que brindan información sobre las características del suelo

5.4.1. IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi): Es la corporación que elabora los mapas oficiales y la cartografía fundamental del país; además de, crear el catastro nacional de las propiedades inmuebles; efectuar el registro de las propiedades de los terrenos; anticipar estudios geográficos como apoyo al desarrollo nacional; preparar y moldear profesionales en ciencias relacionadas en sistemas de información geográfica (SIG) y dirigir el proceso de la Infraestructura Colombiana de Datos Espaciales (ICDE). (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2018).

Su misión es producir, indagar, reglamentar, ordenar y publicar la información a nivel geográfico, cartográfico, agrológico, catastral, geodésico y geoespacial para su utilidad en las metodologías de gestión de planificación, desarrollo y conocimiento integral de Colombia. (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2018).

5.4.2. SGC (Servicio Geológico Colombiano): Es un instituto técnico y científico adscrito al ministerio de minas y energía, además de ser participante del sistema nacional de

ciencia y tecnología que se encarga del estudio de geociencias básicas. (Servicio Geológico Colombiano, 2015).

La misión principal de esta entidad es aportar al desarrollo social y económico del país, mediante descubrimientos en geociencias esenciales y adaptadas del subsuelo, el capacidad de uso de los recursos, la valoración y vigilancia de desafíos de ámbitos geológicos, la administración del conocimiento, la indagación y la constante de inpección en temas nucleares y radiactivos, atendiendo las primacías de las políticas del Gobierno. (Servicio Geológico Colombiano, 2015).

5.5. Herramientas o programas necesarios para el proyecto

5.5.1. SoilGrids 3D: Es un sistema de mapeo digital global del suelo que utiliza procedimientos de aprendizaje automático de última generación para mapear la distribución espacial de las propiedades y algunas características del suelo en todo el mundo. Los modelos de predicción de SoilGrids se ajustan empleando más de 230 000 observaciones de perfil de terreno de la base de datos WoSIS y una serie de covariables ambientales. Las incógnitas se seleccionaron de un grupo de más de 400 capas ambientales de productos derivados de la exploración de la Tierra y otra información que incluye el clima, la cobertura del suelo y la morfología del terreno. (ISRIC, 2017).

Están disponibles mapas de las siguientes propiedades del suelo: pH, contenido de carbono orgánico del terreno, densidad aparente, contenido de fragmentos gruesos, contenido de arena, limo y arcilla, capacidad de intercambio catiónico (CEC), nitrógeno total, así como la densidad de carbono orgánico del suelo. (ISRIC, 2017).

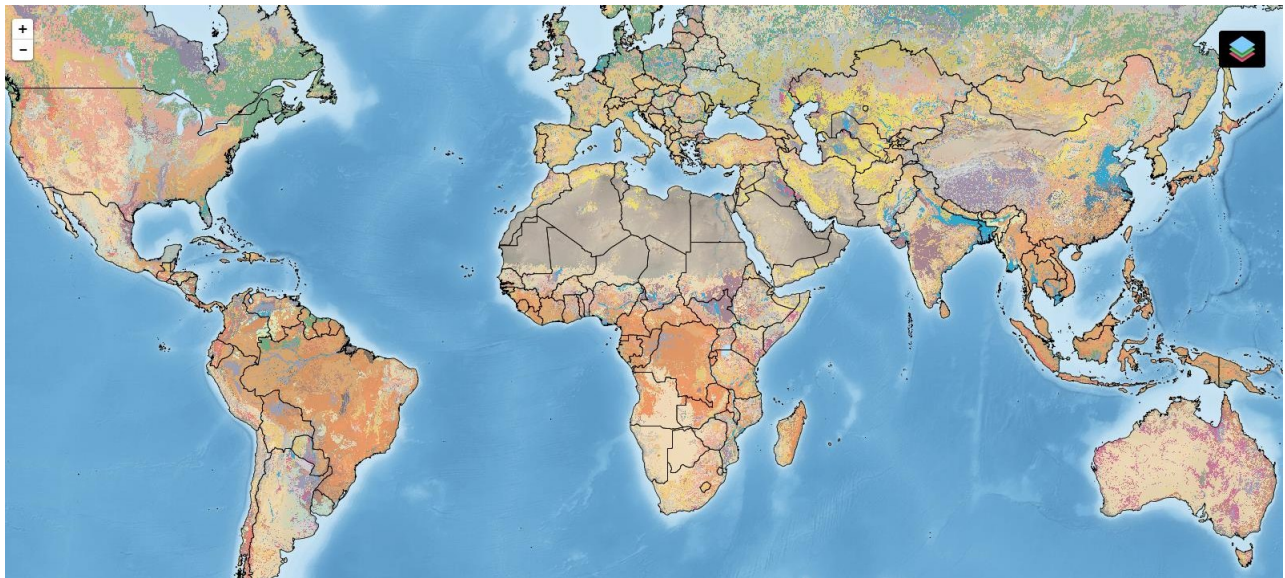


Figura 10 Fragmento visual del programa online SoilGrids 3D.

Fuente: Extraída de (ResearchGate, 2017).

5.5.2. QGIS: Es un programa de la rama GIS gratuito fácil de manejar, con las opciones de ver, editar, administrar, examinar información y reparar mapas de todo tipo. Este GIS tiene la gran operatividad analítica por medio de la inclusión de otros suministradores de notaciones informáticas. (OSGeoLive, s.f.).

Sus características principales son: Interfaz de usuario gráfica amigable, una fácil visualización de varios formatos vectoriales y ráster, crear, editar y exportar datos espaciales, realizar un análisis de carácter espacial usando un soporte, opción de publicación en internet y arquitectura de plugin extensible. (OSGeoLive, s.f.).

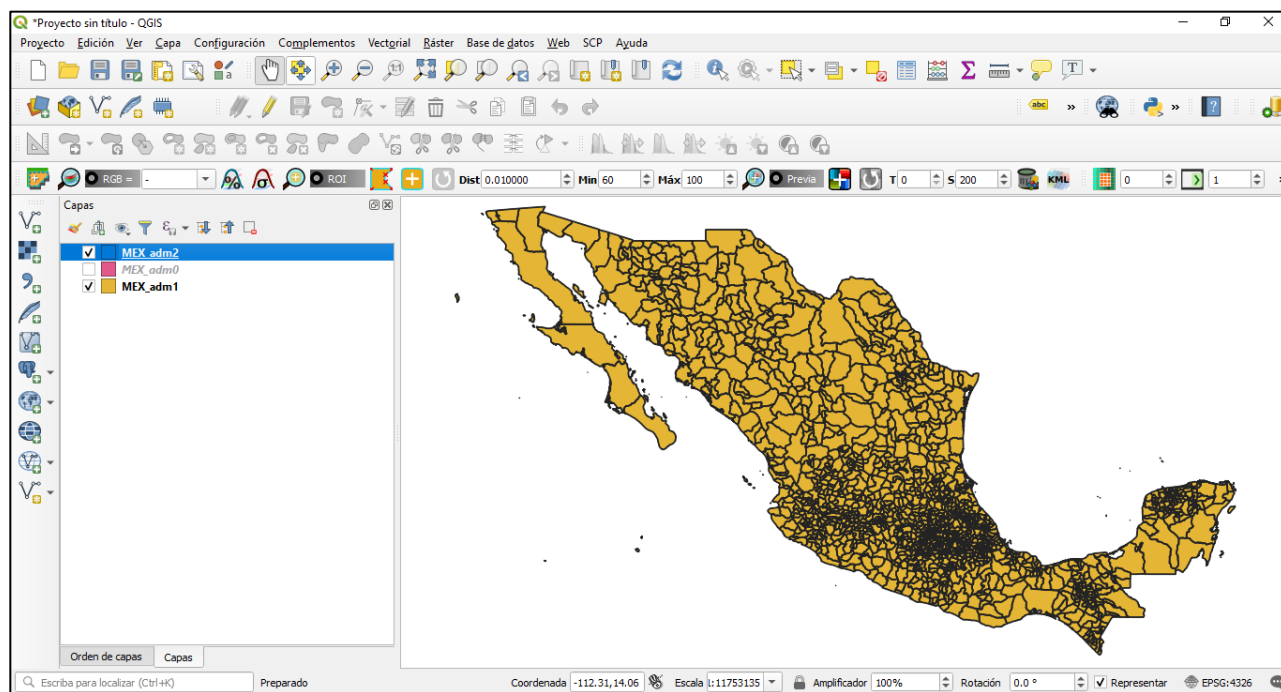


Figura 11 Fragmento visual del software QGIS.

Fuente: Extraída de (OSGeoLive, s.f.).

6. Estado del conocimiento

Para todo trabajo de grado es fundamental la continua búsqueda del conocimiento encaminada a cada una de las problemáticas y temáticas que se plantean; principalmente por el hecho de ser una herramienta que ubica aquellos interesados del tema en términos de relevancia e importancia, en este caso, se habla de la infiltración. Un fenómeno internacional que abrió una serie de incógnitas a partir del año 1990 presentando diversos aportes de manera ascendente hasta el día de hoy que, por ejemplo, en el año 2020 ya se encuentran registrados 2 nuevos artículos como se presenta en la figura 12.

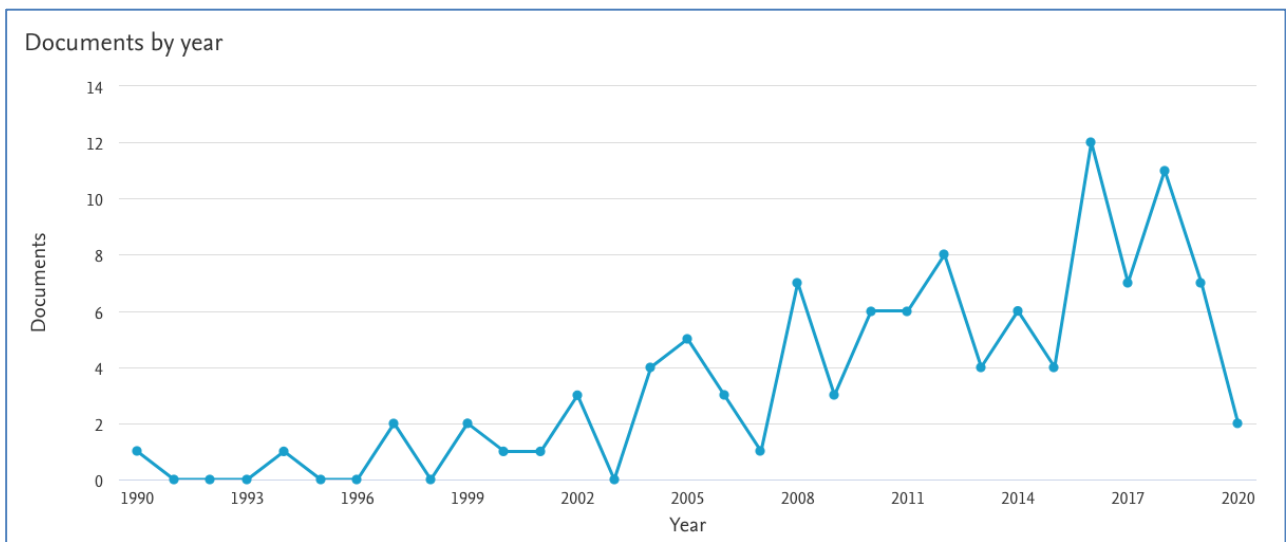


Figura 12 Análisis de documentos relacionados con la infiltración por año

Fuente: Extraída de (Scopus, 2020).

Otro dato notable que se puede encontrar con el estado del conocimiento es la creación de estudios investigativos a nivel territorial, donde cabe recalcar que Colombia se encuentra entre los primeros tres países con más creación de documentos relacionados con el evento de la infiltración; esto claramente generado por la complicada geología del país.

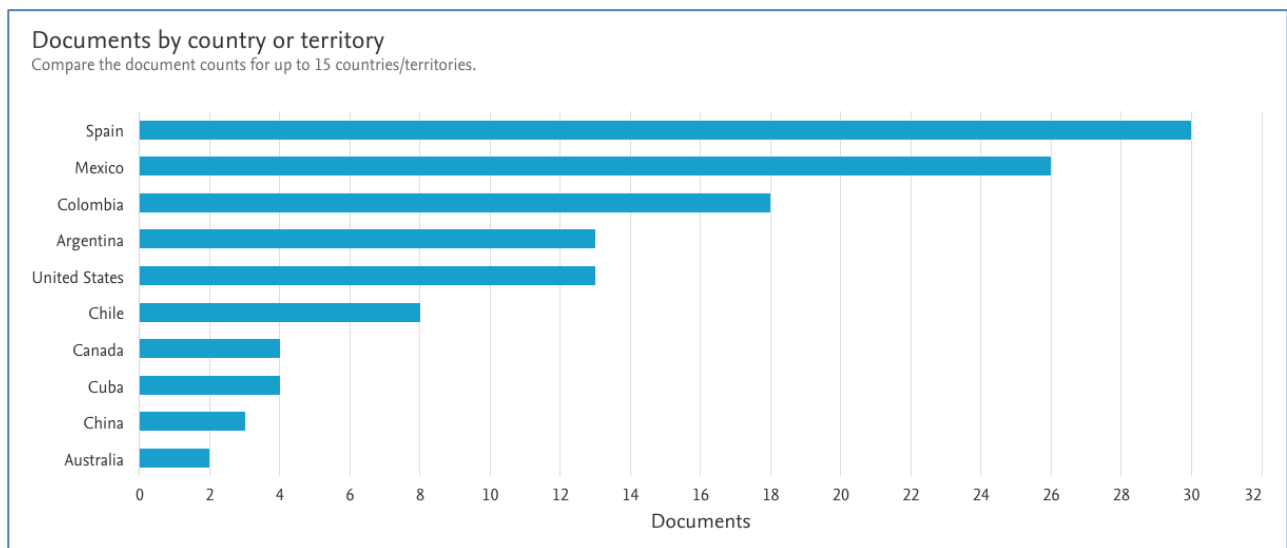


Figura 13 Análisis de documentos relacionados con la infiltración por país

Fuente: Extraída de (Scopus, 2020).

Como apunte final a resaltar con las estadísticas de búsqueda, encontramos que las ingenierías ocupan el tercer puesto de área temática de estos artículos científicos con un total de 35

documentos, es decir, el 19,6% al igual que con las ciencias agropecuarias y biológicas. Con esto, se presenta la interdisciplinariedad que se encuentra alrededor del efecto de la infiltración.

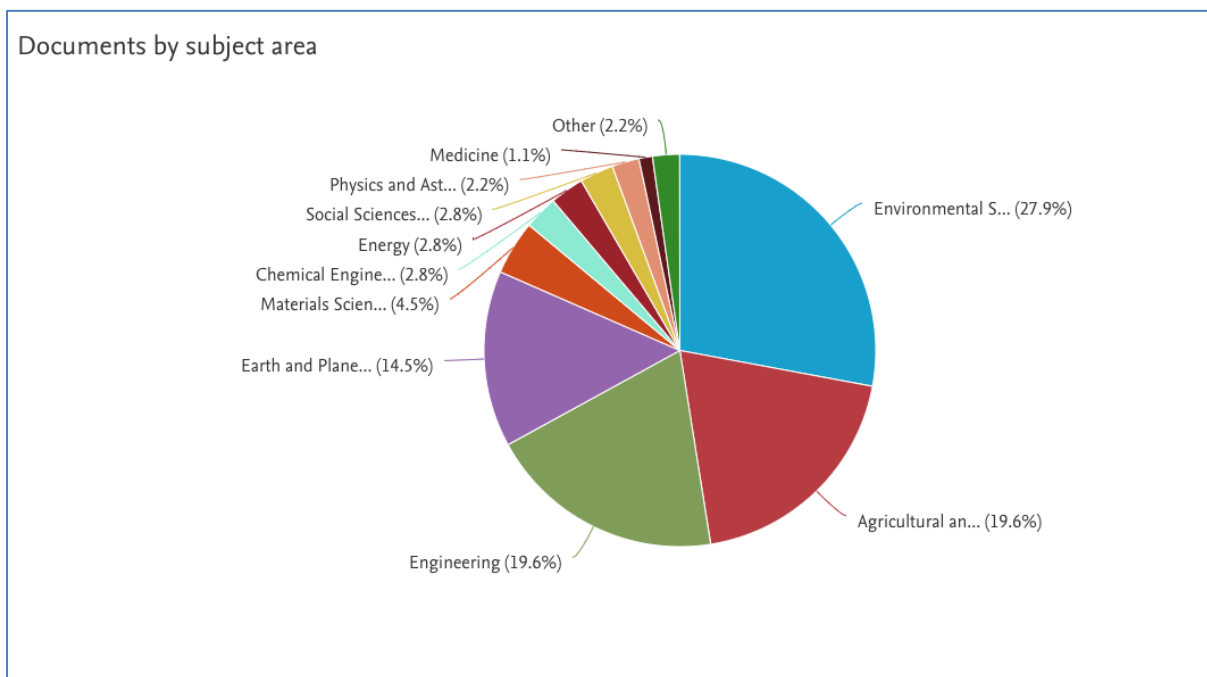


Figura 14 Análisis de documentos relacionados con la infiltración por área temática

Fuente: Extraída de (Scopus, 2020).

Con la información anterior, la tabla 1 muestra las revistas más activas en el tema y de las cuales se tomaron una considerable cantidad de artículos sobre los parámetros de infiltración:

Tabla 1 Documentos científicos encontrados por revistas en relación con la infiltración.

| REVISTA | CITA |
|---------------------------------------|--|
| Environmental Earht Science | (Rahardjo, Ong, Rezaur, Leong, & Fredlund, 2010) |
| Water Resources Management | (Ravindra & Bhabagrahi, 2011) |
| Journal of Mountain Science | (Cheng, Dong, Qian, & Sun, 2017) |
| Journal of Soils and Sediments | (Lei, Fan, Zeng, & Huang, 2020) |
| Geoderma | (Ren, Hong, Li, Kang, & Li, 2020) |
| Journal of Hydrology | (Putte, y otros, 2013) (Singh Kumar, y otros, 2020) |

| | |
|--|--|
| | (Omuto, Minasny, McBratney, & Biamah, 2006) (Latorre & Fernández Moret, 2019) |
| Science China Technological Sciences | (Hu, Yang, & Tian, 2009) |
| Transport in Porous Media | (Hammecker, Barbiéro, Boivin, Maeght, & B. Diaw, 2004) (Jiao, Zhang, & Zhu, 2017) |
| Eurasian Soil Science | (Larionov, y otros, 2017) |
| Water (Switzerland) | (Pedersen, y otros, 2016) |
| Journal of Physical Science | (Muntohar & Liao, 2019) |
| Perspectives In Science Applied Water Science | (Zakwan, Muzzammil, & Alam, 2016) (Singh, Sihag, & Deswal, 2019) |
| Journal of Hydraulic Engineering | (Rawls, ASCE, Brakensiek, & Miller, 1983) |
| Hydroresearch | (Warsi, y otros, 2019) |

Fuente: Elaboración Propia (2020).

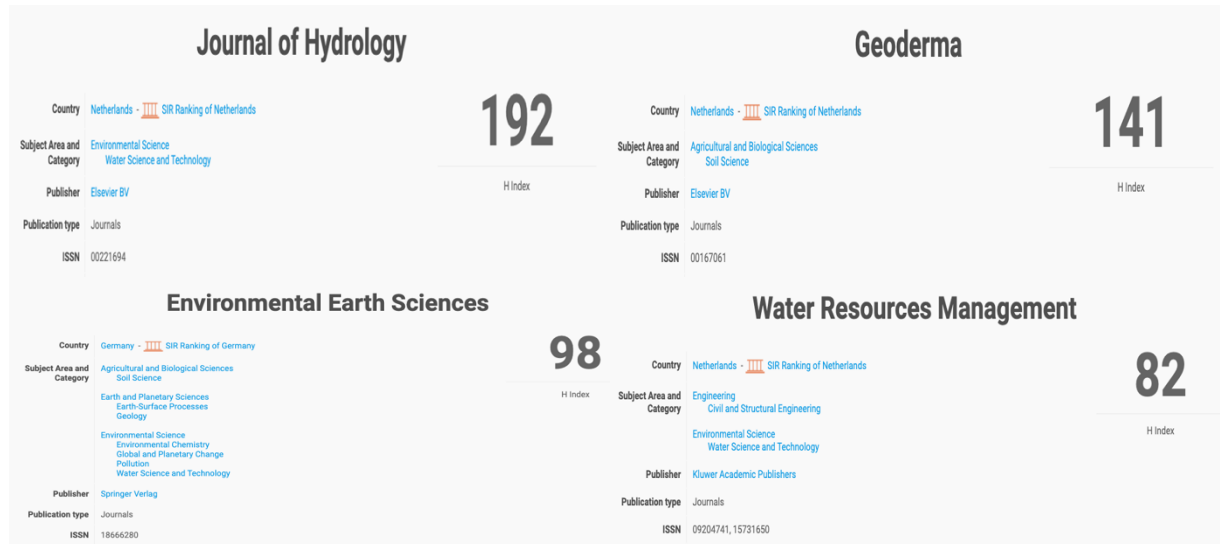
A partir de estos artículos encontrados, se decidió seleccionar los más sobresalientes con el tema específico propuesto y plasmarlo en la tabla 2:

Tabla 2 Documentos seleccionados por su notorio impacto en relación con la problemática propuesta.

| REVISTA | ARTÍCULOS RELEVANTES |
|--|---|
| Environmental Earth Science | (Rahardjo, Ong, Rezaur, Leong, & Fredlund, 2010) |
| Water Resources Management | (Ravindra & Bhabagrahi, 2011) |
| Journal of Mountain Science | (Cheng, Dong, Qian, & Sun, 2017) |
| Journal of Soils and Sediments | (Lei, Fan, Zeng, & Huang, 2020) |
| Geoderma | (Ren, Hong, Li, Kang, & Li, 2020) |
| Journal of Hydrology | (Putte, y otros, 2013) (Singh Kumar, y otros, 2020) |
| Perspectives In Science Hydroresearch | (Zakwan, Muzzammil, & Alam, 2016) (Warsi, y otros, 2019) |
| Journal of Hydraulic | (Rawls, ASCE, Brakensiek, & Miller, 1983) |

Fuente: Elaboración Propia (2020).

A continuación, en la figura 15 se muestra el índice H de las revistas científicas implicadas más destacadas; esto ayuda a comprender la cantidad de citas en las que se han presentado los



artículos:

Fuente: Extraída de (Scimago Journal & Country Rank, 2020).

6.1. Descripción de los artículos más relevantes con el tema propuesto

A continuación, se presentarán las recapitulaciones de los diferentes artículos con más relevancia e interés frente a la problemática identificada, con el fin de hallar una estimación de parámetros de infiltración correcta basada en la información encontrada en estos escritos científicos seleccionados.

Figura 15 Índice H de algunas revistas citadas

6.1.1. Parámetros de infiltración Green-Ampt de datos del suelo.

El desarrollo del documento se basa en un análisis de 5000 horizontes de suelo donde se describe un procedimiento o metodología para determinar los parámetros de infiltración con Green-

Ampt basados en las propiedades del suelo utilizando completamente la información del levantamiento de este. (Rawls, ASCE, Brakensiek, & Miller, 1983).

Para llegar a este punto primero se buscó un modelo que dará procedimientos eficaces a la hora de estimar los parámetros del suelo de manera puntual, y, además, que cuantificará la variación temporal de estos; nos referimos a Green-Ampt. Su ecuación representativa es:

$$f = K \left(1 + \frac{n \Psi_f}{F} \right)$$

Figura 16 Fórmula Green-Ampt de la tasa de infiltración.

Fuente: Extraída de (Rawls, ASCE, Brakensiek, & Miller, 1983).

Donde K representa la conductividad eléctrica en cm/h, Ψ_f es la humectación del cabezal de presión capilar frontal en cm, n es la pureza disponible que se calcula como la porosidad efectiva menos el valor inicial del fluido en el suelo y F como la cantidad de infiltración en cm. Claramente estos son las propiedades necesarias para ejecutar el modelo. (Rawls, ASCE, Brakensiek, & Miller, 1983).

Para la base de datos utilizados en el estudio se hizo una recopilación de las características del agua del suelo publicados, a partir de 1978 para aproximadamente 1200 tipos de terreno que cubrieron 34 estados de los EE. UU. Cada conjunto de muestra incluye como máximo: Descripciones detalladas del perfil; distribución del tamaño de las partículas; densidad aparente; porosidad total; mineralogía de arcilla; datos químicos del terreno ; y 5 a 10 válvulas de retención de agua que cubren un rango de potenciales matriciales de 160 cm - 15,300 cm. (Rawls, ASCE, Brakensiek, & Miller, 1983).

Los información básica cubrió la mayoría de los suelos agrícolas con las propiedades físicas, esto incluye un amplio rango de contenido de arena (promedio 56%, rango 0.1% - 99%), de limo (promedio 26%, rango 0.1% - 93%), de arcilla (media 18%, rango 0.1% - 94%), de materia orgánica (media 0.66%, rango 0.1% - 12.5%), y densidad aparente (media 1.42 gm/cm^3 , rango 0.6

gm/cm^3 - $2.09 gm/cm^3$). Los suelos incluían también minerales arcillosos expansivos y no expansivos. (Rawls, ASCE, Brakensiek, & Miller, 1983).

Gracias a esta investigación se hallaron los parámetros de infiltración, organizándolos y exponiéndolos en la siguiente figura:

| Soil texture class (1) | Horizon (2) | Sample size (3) | Total porosity, ϕ , in cubic centimeters per cubic centimeters (4) | Effective porosity, θ_e , in cubic centimeters per cubic centimeters (5) | Wetted front capillary pressure, ψ_f^a , in centimeters (6) | Hydraulic conductivity, K^b , in centimeters per hour (7) |
|------------------------|-------------|-----------------|---|---|--|---|
| Sand ^c | A | 762 | 0.437 (0.374-0.500) ^d | 0.417 (0.354-0.480) | 4.95 (0.97-25.36) | 11.78 |
| | B | 370 | 0.452 (0.396-0.508) | 0.431 (0.375-0.487) | 5.34 (1.24-23.06) | |
| | C | 185 | 0.440 (0.385-0.495) | 0.421 (0.365-0.477) | 6.38 (1.31-31.06) | |
| Loamy sand | A | 127 | 0.424 (0.385-0.463) | 0.408 (0.365-0.451) | 2.07 (0.32-13.26) | 2.99 |
| | B | 338 | 0.437 (0.363-0.506) | 0.401 (0.329-0.473) | 6.13 (1.35-27.94) | |
| | C | 110 | 0.457 (0.385-0.529) | 0.424 (0.347-0.501) | 6.01 (1.58-22.87) | |
| Sandy loam | A | 49 | 0.447 (0.379-0.515) | 0.412 (0.334-0.490) | 4.21 (1.03-17.24) | 1.09 |
| | B | 36 | 0.424 (0.372-0.476) | 0.385 (0.323-0.447) | 5.16 (0.76-34.85) | |
| | C | 666 | 0.453 (0.351-0.555) | 0.412 (0.283-0.541) | 11.01 (2.67-45.47) | |
| Loam | A | 119 | 0.505 (0.399-0.611) | 0.469 (0.330-0.608) | 15.24 (5.56-41.76) | 0.34 |
| | B | 219 | 0.466 (0.352-0.580) | 0.428 (0.271-0.585) | 8.89 (2.02-39.06) | |
| | C | 66 | 0.418 (0.352-0.484) | 0.389 (0.310-0.468) | 6.79 (1.16-39.65) | |
| Silt loam | A | 383 | 0.463 (0.375-0.551) | 0.434 (0.334-0.534) | 8.89 (1.33-59.38) | 0.65 |
| | B | 76 | 0.512 (0.427-0.597) | 0.476 (0.376-0.576) | 10.01 (2.14-46.81) | |
| | C | 67 | 0.512 (0.408-0.616) | 0.498 (0.382-0.614) | 6.40 (1.01-40.49) | |
| Sandy clay loam | A | 47 | 0.412 (0.350-0.474) | 0.382 (0.305-0.459) | 9.27 (0.87-99.29) | 0.15 |
| | B | 1,206 | 0.501 (0.420-0.582) | 0.486 (0.394-0.578) | 16.68 (2.92-95.39) | |
| | C | 361 | 0.527 (0.444-0.610) | 0.514 (0.425-0.603) | 10.91 (1.89-63.05) | |
| Clay loam | A | 267 | 0.533 (0.430-0.636) | 0.515 (0.387-0.643) | 7.21 (0.86-60.82) | 0.10 |
| | B | 73 | 0.470 (0.409-0.531) | 0.460 (0.396-0.524) | 12.62 (3.94-40.45) | |
| | C | 498 | 0.398 (0.332-0.464) | 0.330 (0.235-0.425) | 21.85 (4.42-108.0) | |
| Silty clay loam | A | — ^e | — | — | — | 0.10 |
| | B | 198 | 0.393 (0.310-0.476) | 0.330 (0.223-0.437) | 26.10 (4.79-142.30) | |
| | C | 32 | 0.407 (0.359-0.455) | 0.332 (0.251-0.413) | 23.90 (5.51-103.75) | |
| Silty clay | A | 366 | 0.464 (0.409-0.519) | 0.309 (0.279-0.501) | 20.88 (4.79-91.10) | 0.06 |
| | B | 28 | 0.497 (0.434-0.560) | 0.430 (0.328-0.532) | 27.00 (6.13-118.9) | |
| | C | 99 | 0.451 (0.401-0.501) | 0.397 (0.228-0.530) | 18.52 (4.36-78.73) | |
| Sandy clay | A | 55 | 0.452 (0.412-0.492) | 0.400 (0.320-0.480) | 15.21 (3.79-61.01) | 0.05 |
| | B | 689 | 0.471 (0.418-0.524) | 0.432 (0.347-0.517) | 27.30 (5.67-131.50) | |
| | C | 65 | 0.509 (0.449-0.569) | 0.477 (0.410-0.544) | 13.97 (4.20-46.53) | |
| Silty clay | A | 191 | 0.469 (0.423-0.515) | 0.441 (0.374-0.508) | 18.56 (4.08-84.44) | 0.06 |
| | B | 39 | 0.475 (0.436-0.514) | 0.451 (0.386-0.516) | 21.54 (4.56-101.7) | |
| | C | 45 | 0.430 (0.370-0.490) | 0.321 (0.207-0.435) | 23.90 (4.08-140.2) | |
| Clay | A | — | — | — | — | 0.03 |
| | B | 23 | 0.435 (0.371-0.499) | 0.335 (0.220-0.450) | 36.74 (8.33-162.1) | |
| | C | 127 | 0.479 (0.425-0.533) | 0.423 (0.334-0.512) | 29.22 (6.13-139.4) | |
| Clay | A | — | — | — | — | 0.03 |
| | B | 38 | 0.476 (0.445-0.507) | 0.424 (0.345-0.503) | 30.66 (7.15-131.5) | |
| | C | 21 | 0.464 (0.430-0.498) | 0.416 (0.346-0.486) | 45.65 (18.27-114.1) | |
| Clay | A | 291 | 0.475 (0.427-0.523) | 0.385 (0.269-0.501) | 31.63 (6.39-156.5) | 0.03 |
| | B | — | — | — | — | |
| | C | 70 | 0.470 (0.426-0.514) | 0.412 (0.309-0.515) | 27.72 (6.21-123.7) | |
| Clay | A | 23 | 0.483 (0.441-0.525) | 0.419 (0.294-0.544) | 54.65 (10.59-282.0) | 0.03 |
| | B | — | — | — | — | |
| | C | — | — | — | — | |

Figura 17 Parámetros Green-Ampt según clases de textura del suelo y sus respectivos horizontes.

Fuente: Extraída de (Rawls, ASCE, Brakensiek, & Miller, 1983).

Usando la ecuación de Brooks y Corey se ajustó a los datos de retención de agua y se llegó a la conclusión que usando el modelo Green-Ampt es inapropiado para los estudios de suelo o levantamientos de orden 5. Sin embargo, para los anteriores son más adecuados con la predicción de la curva de tensión de humedad en función de la distribución del tamaño de la partícula, la materia orgánica, la densidad aparente y el contenido de agua de 1/3 a 15 bar. O también, estimar los parámetros basados en el horizonte de perfil y las clases de textura del suelo. (Rawls, ASCE, Brakensiek, & Miller, 1983).

6.1.2. Parámetros de respuesta para la caracterización de la infiltración.

Este artículo demuestra en su máximo esplendor la particularidad que existe con el tema de la infiltración, ya que dependiendo del estado del suelo (saturado o no saturado) se pueden hallar una considerable cantidad de parámetros que hacen el trabajo de estudio más complejo o en su defecto más sencillo. Este documento se centró en el estudio del efecto de la intensidad de la precipitación en la infiltración; Para esto, usaron un modelado de elementos finitos en una muestra de terreno de 5 metros de altura sujeto a distintas intensidades de lluvia. (Rahardjo, Ong, Rezaur, Leong, & Fredlund, 2010).

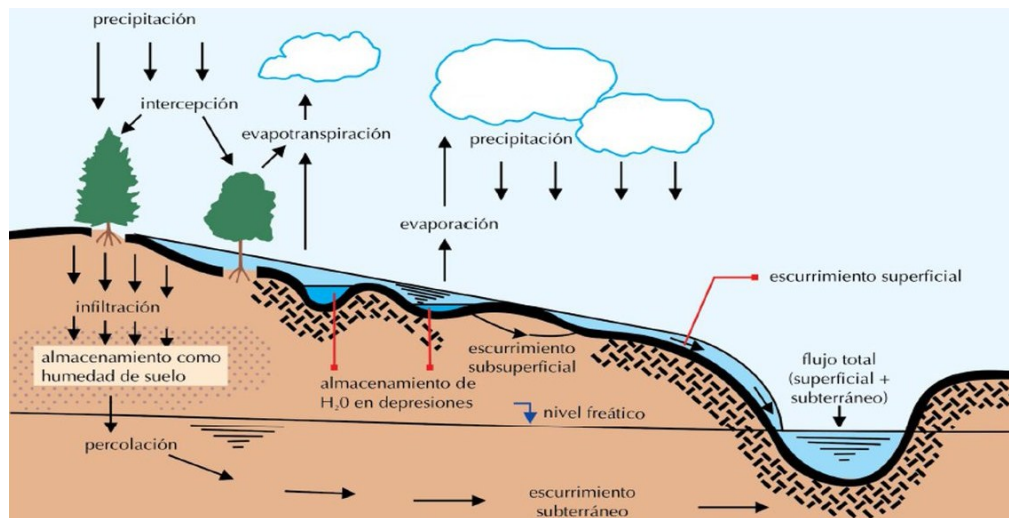


Figura 18 Efecto de las condiciones climáticas en el perfil de presión de poros del agua cerca de la superficie del suelo de una pendiente.

Fuente: Extraída de (Rahardjo, Ong, Rezaur, Leong, & Fredlund, 2010).

La metodología usada se realizó en tres pasos: El diseño de un estudio paramétrico, realizar un análisis de infiltración y, por último, la identificación de los parámetros de respuesta frente al desarrollo del modelo.

Para el primer escalón se creó una tabla con las variables implicadas mostradas a continuación:

| Serie | La lluvia en función de k_s | Intensidad de lluvia, I (mm / h) | Coefficiente de permeabilidad saturado del suelo, k_s (m / s) | Profundidad del manto freático, D_{WT} (m) | Duración de la lluvia, T (h) |
|-------|-------------------------------|------------------------------------|---|--|--------------------------------|
| 1 | $0.1 \times k_s$ | 0,36 | 1.0×10^{-6} | 5.0 | 24 |
| 2 | $0.5 \times k_s$ | 1,8 | 1.0×10^{-6} | 5.0 | 24 |
| 3 | $1.0 \times k_s$ | 3.6 | 1.0×10^{-6} | 5.0 | 24 |
| 4 4 | $2.5 \times k_s$ | 9.0 | 1.0×10^{-6} | 5.0 | 24 |
| 5 5 | $5.0 \times k_s$ | 18 años | 1.0×10^{-6} | 5.0 | 24 |

Figura 19 Series de valores en el estudio paramétrico.

Fuente: Extraída de (Rahardjo, Ong, Rezaur, Leong, & Fredlund, 2010).

En ella se representan los datos representativos del suelo unidimensional homogéneo de 5 metros de altura y 4 de ancho sometida a una simulación por un periodo de 24 horas para analizar la infiltración en suelo saturado; Además, cabe aclarar que el coeficiente de permeabilidad saturado del suelo se tomó como 1.0×10^{-6} m/s ya que es el factor típico del terreno en Singapur. (Rahardjo, Ong, Rezaur, Leong, & Fredlund, 2010).

Acto seguido, se efectuó el análisis con una ecuación diferencial parcial gobernante para el flujo de agua transitoria:

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(-k_w y \frac{\partial h_w}{\partial y} \right) + q = m_w^2 \gamma_w \frac{\partial h_w}{\partial t}$$

Figura 20 Ecuación diferencial parcial del flujo de agua transitorio.

Fuente: Extraída de (Rahardjo, Ong, Rezaur, Leong, & Fredlund, 2010).

Finalmente, se encuentran los siguientes parámetros de respuesta: **La profundidad del frente humectante** que se define como la profundidad desde la superficie del terreno sobre la cual el grado de saturación varía debido a la infiltración de humedad. **Profundidad matricial de reducción de succión** que se explica como la profundidad máxima por encima de la cual la succión matricial se ha reducido más de un porcentaje n de la succión inicial y la **tasa de infiltración seccional** que describe como la velocidad a la cual la precipitación infiltrante, fluye más allá de una sección a través de la columna del suelo. (Rahardjo, Ong, Rezaur, Leong, & Fredlund, 2010).

Llegando a la conclusión del artículo científico, la cual es hallar un cálculo que, de un factor de seguridad fiable para los taludes sujetos a la lluvia, a través de estos parámetros hallados como indicador aproximado de la cuantificación del potencial de la infiltración en estas zonas. (Rahardjo, Ong, Rezaur, Leong, & Fredlund, 2010).

6.1.3. Modelos de infiltración Green-Ampt para condiciones de campo variadas: una nueva visita.

El documento se basa en la explicación del modelo de infiltración Green-Ampt, siendo este, un ejemplar simplificado y preciso frente a muchas situaciones de campo que se presentan como el cálculo de la infiltración se lluvia-escorrentía en un terreno, el transporte de efluentes en aguas subterráneas, estudio de la gestión de riego, entre otras cosas. (Ravindra & Bhabagrahi, 2011).

Cabe resaltar, que su aplicabilidad se da principalmente en varios escenarios de suelos homogéneos. Y por esta misma razón, es de entender que debido a los cambios climáticos recientes y las distintas tipologías del terreno exigen que los modelados estén sujetos a cada situación específica partiendo de condiciones heterogéneas del suelo. (Ravindra & Bhabagrahi, 2011).

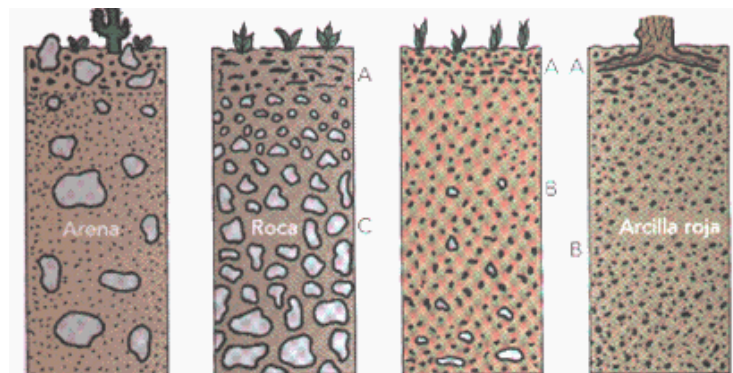


Figura 21 Suelo homogéneo en diferentes tipos de material.

Fuente: Extraída de (VisitaelSalvador, s.f).

Es por esto que, los autores se centran en el análisis de la utilidad de las diferentes variables de los modelos de infiltración Green-Ampt en términos de complejidad, límites de aplicabilidad y precisión.



Figura 22 Perfil de infiltración para el modelo Green-Ampt.

Fuente: Extraída de (Ravindra & Bhabagrahi, 2011).

Algo para tener en cuenta, es que la principal ventaja de Green-Ampt a comparación con la ecuación de Richards es que solo son necesarios dos parámetros para caracterizar las propiedades del suelo, mientras que, con el otro método ya mencionado, se requiere de más. (Ravindra & Bhabagrahi, 2011).

Además, se concluye que por los estudios que se realizan en el documento, el modelo de infiltración analizado se aprueba por su simpleza y autosuficiencia a la hora de crear investigaciones hidrológicas en diversas situaciones de campo. (Ravindra & Bhabagrahi, 2011).

Otras características a remarcar son su capacidad de representar la heterogeneidad espacial del suelo de manera grupada y es aplicable para el suelo de varias capas siempre y cuando se tenga la información sobre la formación geológica disponible para el área de estudio. (Ravindra & Bhabagrahi, 2011).

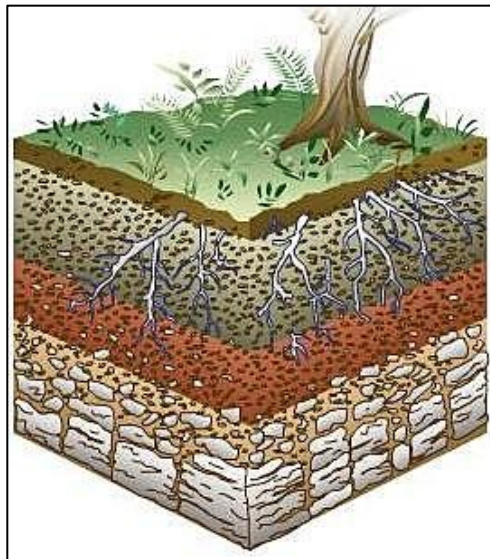


Figura 23 Suelo heterogéneo.

Fuente: Extraída de (Martín. A, s.f).

6.1.4. Observación y modelado en el proceso de infiltración irregular del agua del suelo púrpura.

En este escrito científico, se diseñó un dispositivo específico para observar como son los procesos de infiltración en suelos homogéneos y heterogéneos con perfiles triangulares directos e inversos y para el modelado se usó Green-Ampt. (Cheng, Dong, Qian, & Sun, 2017).

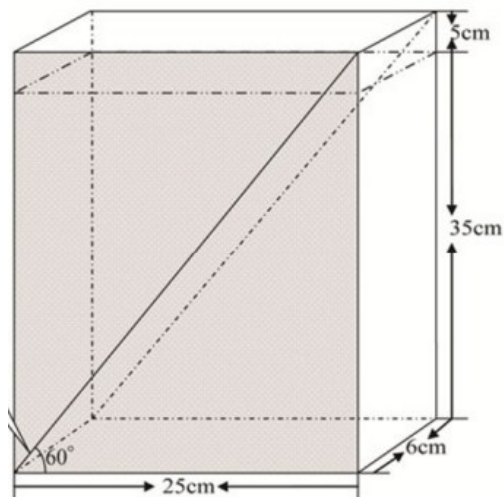


Figura 24 Dispositivo de infiltración de agua del suelo.

Fuente: Extraída de (Cheng, Dong, Qian, & Sun, 2017).

El dispositivo es una caja de plexiglás, un bulbo húmedo invertido y una división de forma triangular por medio de un tablero como se muestra en la figura 24. Cada una de las partes tenía un tipo de suelo diferente con la intención de investigar el fenómeno de infiltración en perfiles irregulares. (Cheng, Dong, Qian, & Sun, 2017).

La muestra de suelo se rellenó hasta una medida de 35 cm, luego se retiró la sección divisoria; para los suelos homogéneos se usaron arcillas o arena, por lo tanto, se realizaron cuatro experimentos y a cada uno se ejecutaron tres repeticiones. Para el terreno heterogéneo se utilizó un suelo tipo F/C Y C/F a una carga de agua constante de 1 cm. (Cheng, Dong, Qian, & Sun, 2017).

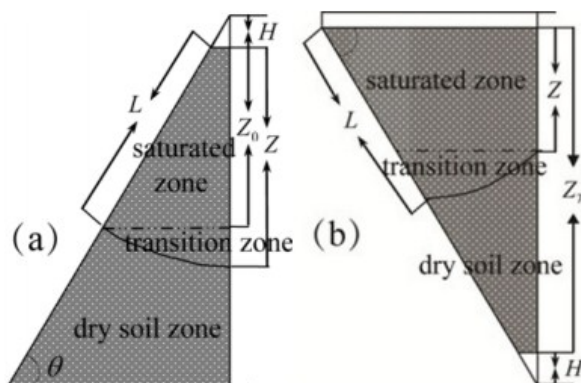


Figura 25 Diseño de (a) perfil de suelo triangular y (b) triangular invertido para suelo homogéneo.

Fuente: Extraída de (Cheng, Dong, Qian, & Sun, 2017).

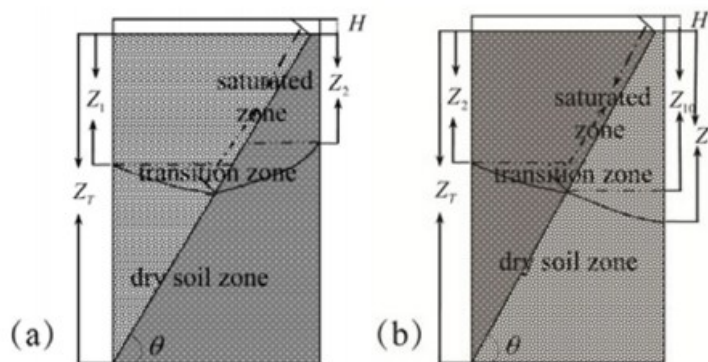


Figura 26 Diseño de infiltración del suelo en (a) tipo C / F y (b) perfil triangular tipo F / C para suelos heterogéneos.

Fuente: Extraída de (Cheng, Dong, Qian, & Sun, 2017).

Finalmente, los resultados y observaciones del análisis fueron:

- 1) Durante el paso inicial, el movimiento del agua fue controlado gracias a la succión del suelo y así mismo, el frente humectante se propaga rápidamente hasta que la tasa de infiltración se vuelve constante.
- 2) El frente humectante se difunde de manera más rápida en el suelo de calidad gruesa a comparación del terreno de calidad fina. Además, para la calidad gruesa se propaga más acelerado en el perfil triangular que en el triangular invertido, mientras que en la calidad fina ocurre lo contrario.
- 3) El frente humectante y la tasa de infiltración tienen una muestra exponencial significativa con el paso del tiempo de infiltración.

6.1.5. Estimación de parámetros para el modelo de infiltración de Kostiakov-Lewis a partir de las propiedades físicas del suelo.

Como ya se ha venido comentando, los modelos de infiltración son herramientas importantes para describir el proceso de este en el suelo. Sin embargo, muchos de estos procesos directos son tediosos a la hora de desarrollarlos. Es por esto que este artículo propone un método efectivo para estimar los parámetros del modelo Kostiakov-Lewis a partir de las propiedades físicas del suelo (SPP). (Lei, Fan, Zeng, & Huang, 2020).

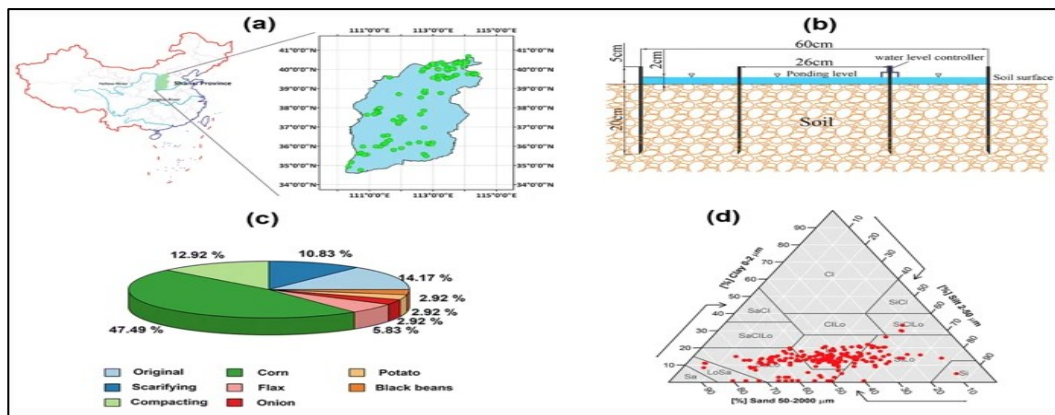


Figura 27 Descripción general del área de estudio y diseño experimental.

Fuente: Extraída de (Lei, Fan, Zeng, & Huang, 2020).

Los parámetros del coeficiente de infiltración del suelo (k), el índice empírico (α) y la tasa de infiltración estable (f_0) se midieron en 240 experimentos de campo en la provincia de Shanxi, China. Las SPP en los puntos de experimentación correspondientes se midieron en la capa superior del suelo y la capa superior del subsuelo. El método de muestreo de Kennard-Stone y el análisis de los elementos principales se utilizaron para dividir las muestras de entrenamiento y extraer los componentes principales de los SPP. Los modelos de mínimos cuadrados parciales, las redes neuronales de retro propagación y una máquina de vectores de soporte se utilizaron para instaurar modelos para estimar los parámetros con las cualidades tangibles del terreno en la capa superior y la capa superior del subsuelo como variables de entrada. (Lei, Fan, Zeng, & Huang, 2020).

Gracias a estas hipótesis y desarrollo de metodologías se pudo obtener la conclusión de que una máquina de vectores de soporte junto con las propiedades físicas del suelo son las entradas adecuadas para un método efectivo y funcional para estimar los parámetros de infiltración del modelo de Kostiakov-Lewis. (Lei, Fan, Zeng, & Huang, 2020).

Otros de los hallazgos secundarios es que se cree que un método similar también se puede implementar de modelos de infiltración como Green-Ampt y Horton. Y, por otra parte, cabe resaltar que la precisión de este modelo depende de las condiciones en las que se encuentre el terreno. (Lei, Fan, Zeng, & Huang, 2020).

6.1.6. Efecto de los cambios en la tasa de infiltración en los suelos urbanos en el proceso de escorrentía de aguas pluviales.

Para este documento se debe tener en cuenta una consulta previa de los autores (cita) donde afirman que las tormentas de lluvia y las inundaciones en las ciudades han aumentado extraordinariamente en los últimos años debido a los fenómenos climáticos de manera exagerada y la aparición de altos niveles de impermeabilidad. (Ren, Hong, Li, Kang, & Li, 2020).

Una vez clarificado los estudios base, el artículo científico exploró teóricamente el mecanismo funcional y el alcance del efecto de la varianza de infiltración en el escurrimiento de aguas pluviales urbanas a través del modelo de gestión de aguas pluviales (SWMM) y el modelo de Horton. Estos se emplearon para simular procesos de lluvia-escorrentía, y el efecto del cambio de las tasas de infiltración. Además, se discute el impacto de la magnitud de la lluvia y la impermeabilidad urbana sobre el efecto del cambio. (Ren, Hong, Li, Kang, & Li, 2020).

| Parámetro | Unidad | Explicación | Este valor |
|---------------------|---------------|---|-------------------|
| Zona | decir ah | Área de subcuenca | 2 |
| Anchura | metro | Ancho de la ruta de flujo terrestre | 150 |
| Pendiente | % | Pendiente superficial promedio | 0.5 0.5 |
| Imperv | % | Porcentaje de área impermeable | 20 |
| N-Imperv | - | Mannings N para área impermeable | 0,01 |
| N-perv | - | Mannings N para área permeable | 0.1 |
| Dstore-imperv | mm | Profundidad del almacenamiento de la depresión en un área impermeable | 0,05 |
| Dstore-perv | mm | Profundidad del almacenamiento de la depresión en el área permeable | 0,05 |
| Cero-imperv | % | Porcentaje de área impermeable sin almacenamiento de depresión | 25 |
| Máxima calificación | mm / h | Velocidad máxima en la curva de infiltración de Horton | 75 |
| MinRate | mm / h | Tasa mínima en la curva de infiltración de Horton | 5 5 |
| Decav | 1 / h | Constante de decaimiento para la curva de infiltración de Horton | 4 4 |
| Tiempo de secado | días | Tiempo para que un suelo completamente saturado se seque por completo | 7 7 |
| Aspereza | - | Coefficiente de rugosidad de Manning | 0,01 |

Figura 28 Selección de parámetros del modelo de gestión de aguas pluviales.

Fuente: Extraída de (Ren, Hong, Li, Kang, & Li, 2020).

Para realizar el modelo SWMM fue necesario la selección de los parámetros mostrados en la figura 28 luego de obtenerlos con el análisis de 10 subcuencas de drenaje simétrico de lado a lado en China y tomar como base el modelo Horton ya que se consideró para este documento como el más seleccionado por su buen rendimiento. (Ren, Hong, Li, Kang, & Li, 2020).

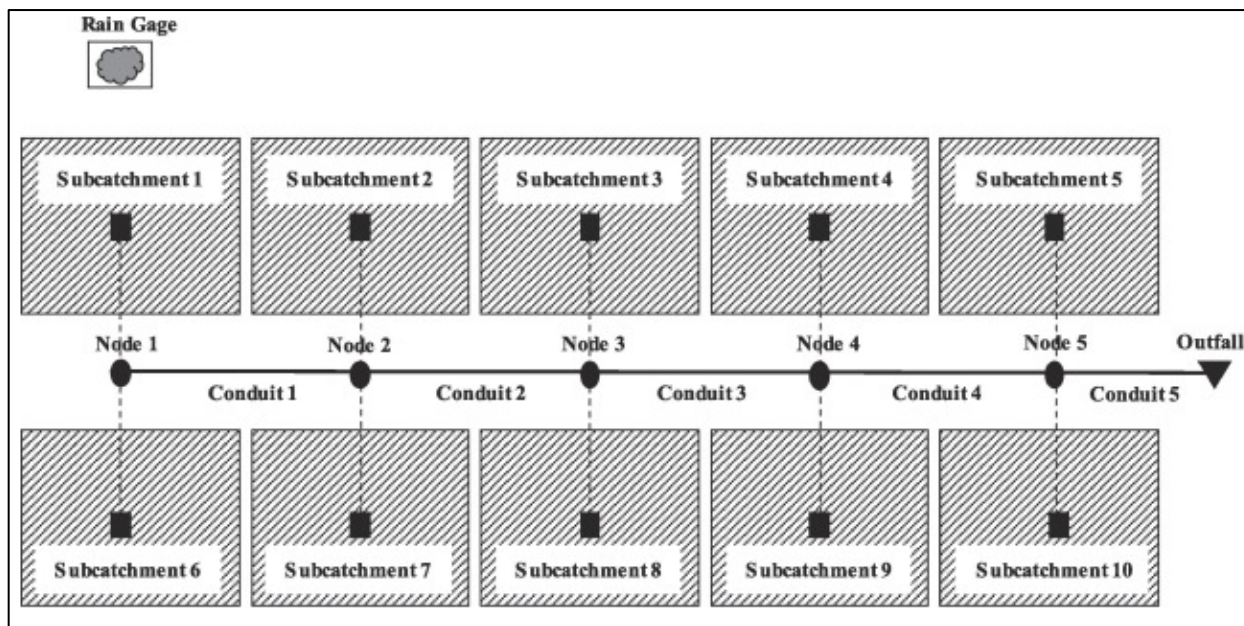


Figura 29 Descripción general del área estudiada.

Fuente: Extraída de (Ren, Hong, Li, Kang, & Li, 2020).

Luego de realizar el modelo con sus respectivos análisis se concluyó por medio de los autores (Ren, Hong, Li, Kang, & Li, 2020) que:

-El cambio de la tasa de infiltración del suelo en el área verde urbana provocaría una reducción en gran medida del coeficiente de escorrentía y por obiedad su respectivo pico, ocasionando una reducción del riesgo de inundación urbana y acumulación de agua.

-Para condiciones de alta intensidad de lluvia, la tasa de infiltración estable (SIR) es la adecuada para mitigar la escorrentía de aguas pluviales de manera más efectiva que mejorando la tasa de infiltración inicial (IIR).

-Para condiciones de baja intensidad de lluvia, es más favorable mejorar el IIR para reducir el pico de escorrentía que con el SIR.

-La impermeabilidad urbana desempeña un papel importante en el efecto del cambio de infiltración del terreno en la disminución de la escorrentía superficial. Con esto, se debe resaltar que, bajo menor impermeabilidad urbana, el efecto de cambio, especialmente con el SIR, estas circunstancias serán favorables para evitar la problemática analizada. Sin embargo, con el aumento de la tasa de impermeabilidad, el efecto que se busca será muy escaso.

6.1.7. Estimación de los parámetros de la ecuación de infiltración Green–Ampt a partir de datos de simulación de lluvia: por qué más simple es mejor.

Este artículo tiene una pequeña introducción sobre los modelos de erosión del suelo y su necesidad de utilizar datos detallados de escorrentía e infiltración como entrada. Esta información como ya se ha venido comentando, se puede hallar por relaciones empíricas o dinámicas (simulaciones). (Putte, y otros, 2013).

Por esta razón, la investigación que lleva estos autores a cabo se centra en el alcance de la derivación de parámetros significativos para el modelo de infiltración Green-Ampt Mein-Larson (GAML) utilizando una agrupación de datos conseguidos de 350 experimentos de simulación de lluvia en un periodo de 6 años en el centro de Bélgica. (Putte, y otros, 2013).

Estas representaciones se ejecutaron en la época de primavera, en principios de verano e invierno en áreas de cultivo de maíz; se realizaron diferentes procesos de labranza y en cuatro puntos específicos se efectuaron los experimentos. (Putte, y otros, 2013).

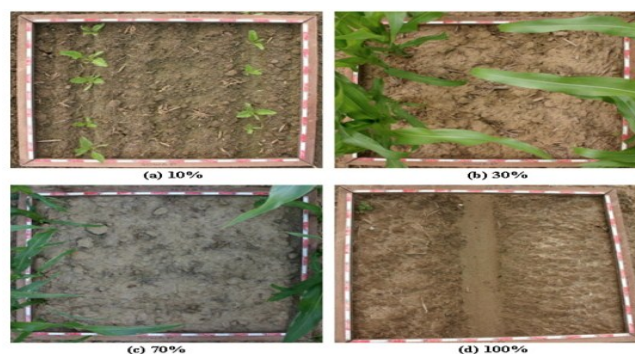


Figura 30 Porcentajes de costra en el suelo del 10% (a), 30% (b), 70% (c) y 100% (d).

Fuente: Extraída de (Putte, y otros, 2013).

La duración de estos eventos estuvo variando entre los 30 y 60 minutos. En cada uno de ellos se midió la relación tiempo escorrentía y por ende la infiltración acumulativa que se evaluó para aplicarlo en el modelo GAML.

| Característica | Abreviatura | Unidades | Gama de cultivos de verano | Gama de cultivos de invierno |
|---|--------------------|-------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Suelo cubierto de corteza | C_r | % | 0-100 | 10-100 |
| Cobertura total (cultivo y residuos) | C_v | % | 0-43 | 0,51-75 |
| Contenido de materia orgánica en la capa superficial del suelo (0-0.05 m) | OM | % | 0,88-5,5 | 1.2-7.4 |
| Peso superficial inicial del volumen seco del suelo | ρ_{bi} | g cm^{-3} | 0.63-1.33 | 0.93-1.52 |
| Contenido de limo en la capa superior del suelo. | Si | % | 26-83 | 36-81 |
| Contenido de arcilla de la capa superior del suelo | Cl | % | 4-26 | 4-14 |
| Relación limo / arena | Si / Sa | | 0,41-33 | 0.64-7.6 |
| Pendiente | Pendiente | % | 1.2-20.5 | 1.2-13 |
| Humedad volumétrica inicial del suelo | θ_{ini} | $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ | 0.02-0.29 | 0.11-0.37 |
| Intensidad de lluvia del experimento | y_0 | mm h^{-1} | 28-82 | 26-82.5 |
| Máxima precipitación diaria desde la siembra hasta el experimento | I_{MAX} | mm día^{-1} | 8-40 | 12-35 |
| Profundidad de lluvia acumulada desde la siembra hasta el experimento. | PAGS | mm | 26-145 | 125-375 |
| Profundidad de lluvia durante 1 a 5 días antes del experimento. | $P_1 - P_5$ | mm | 0-41.5 | 0-12 |

Figura 31 Rango de valores de las características medidas de suelo / superficie y lluvia durante los experimentos de primavera / verano e invierno.

Fuente: Extraída de (Putte, y otros, 2013).

Con estos datos de entrada se realizó una modelación dinámica y los autores (Putte, y otros, 2013) llegaron a las siguientes conclusiones:

-Predecir la generación de esorrentía en tierras de cultivo es extremadamente complicado debido a la velocidad con la que las condiciones del suelo cambian. Y a pesar de la presencia de utilizar Green-Ampt, la predicción no siempre es exitosa.

-El modelo GAML fue un fracaso en la predicción de la esorrentía en los tiempos de invierno ya que se activa una nueva variable que es el subsuelo. Estos últimos son casi imposibles de obtener medidas de manera rutinaria por lo que perjudica en gran manera el estudio.

-Para las condiciones de verano y primavera fueron acertados los hallazgos y se sostiene que los controles de infiltración fueron: La cubierta vegetal del suelo, el contenido de arcilla en el terreno y el estado de la formación de costras en la superficie.

-El modelo de infiltración Green-Ampt crea predicciones certeras solo cuando se permite variar un solo parámetro.

6.1.8. Aplicación de hoja de cálculo para estimar parámetros de infiltración.

La estimación de tasas de infiltración es algo muy importante en la ingeniería de los recursos hídricos, ya que este tipo de datos son necesarios para la estimación de la lluvia efectiva, la recarga de agua subterránea y el diseño de sistemas de riego. (Zakwan, Muzzammil, & Alam, 2016).

Teóricamente la tasa de infiltración sirve como una base de datos de entrada para el análisis hidrográfico que, así mismo, se utiliza en el diseño de estructuras hidráulicas , sistemas de drenaje urbano, estimación para diseños, desarrollo de pronósticos y sistemas de alerta de inundación.

Es por esto que, se diseñaron modelos de predicción para tasas de infiltración como el modelo de Kostiakov, Horton y Philip que fueron los seleccionados para evaluar el rendimiento utilizando un método gráfico convencional y un solucionador GRG. (Zakwan, Muzzammil, & Alam, 2016).

El gradiente reducido generalizado es una herramienta de optimización integrada dentro de Microsoft Excel como solucionador. Con la habilidad de optimizar problemas de programación complejos y no lineales. (Zakwan, Muzzammil, & Alam, 2016).

La opción predeterminada es el método cuasi-Newton y la segunda opción secundaria es el método de gradiente conjugado. Las ecuaciones de infiltración se configuraron en una hoja de cálculo para estimar sus parámetros a partir del solucionador GRG. (Zakwan, Muzzammil, & Alam, 2016).

| Modelo | Ubicación | Parámetros | | | | Índices de rendimiento | | | | | |
|-----------------------------------|-----------|------------|------|------|------|------------------------|------|------|------|----------|------|
| | | 1 | | 2 | | RMSE | | R | | Nebraska | |
| Modelo de Kostiakov (a, b) | Sitio 1 | OM | GM | OM | GM | OM | GM | OM | GM | OM | GM |
| | | 14,4 | 1,9 | 0,36 | 0,46 | 0,70 | 1,28 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,95 |
| | Sitio 3 | 7,0 | 1,2 | 0,26 | 0,38 | 0,35 | 0,59 | 0,99 | 0,99 | 0,98 | 0,95 |
| | Sitio 7 | 26,8 | 4,4 | 0,34 | 0,41 | 0,79 | 1,82 | 1,0 | 0,99 | 0,99 | 0,97 |
| Modelo de Horton (f_o, k) | Sitio 1 | 35,2 | 16,0 | 4,79 | 1,65 | 1,31 | 3,37 | 0,98 | 0,88 | 0,95 | 0,68 |
| | Sitio 3 | 16,2 | 7,3 | 5,1 | 1,9 | 0,71 | 1,51 | 0,97 | 0,89 | 0,93 | 0,70 |
| | Sitio 7 | 63,0 | 32,4 | 4,54 | 1,96 | 2,11 | 5,44 | 0,99 | 0,92 | 0,96 | 0,76 |
| Modelo de Philip (s, K) | Sitio 1 | 12,9 | 11,2 | 0,00 | 0,09 | 1,42 | 1,93 | 0,98 | 0,98 | 0,94 | 0,89 |
| | Sitio 3 | 5,34 | 4,18 | 0,00 | 0,00 | 0,93 | 1,32 | 0,98 | 0,98 | 0,88 | 0,77 |
| | Sitio 7 | 23,2 | 18,6 | 0,00 | 0,14 | 2,81 | 4,56 | 0,99 | 0,99 | 0,94 | 0,83 |

Figura 32 Comparación de parámetros y rendimiento del método optimización (OM) y convencional gráfico (GM).

Fuente: Extraída de (Zakwan, Muzzammil, & Alam, 2016).

Acto seguido, se realizó una evaluación cualitativa del desempeño de los métodos de estimación de parámetros de manera gráfica.

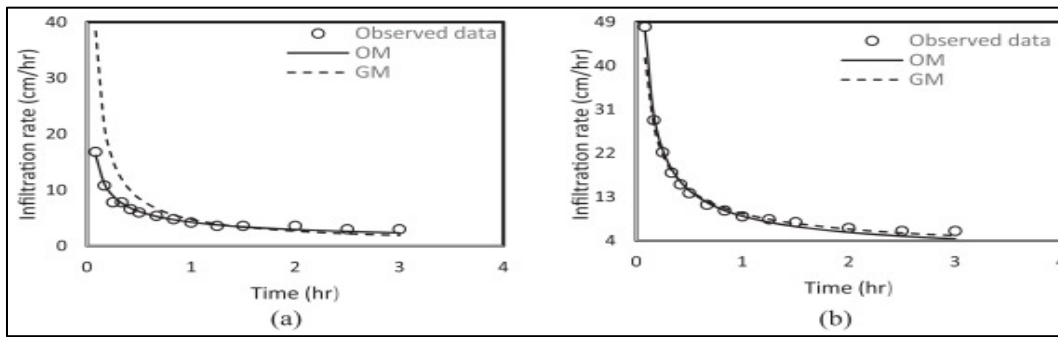


Figura 33 Curvas de infiltración típicas obtenidas por optimización (OM) y métodos gráficos (GM).
Fuente: Extraída de (Zakwan, Muzzammil, & Alam, 2016).

Estas cifras indican que el rendimiento del solucionador GRG es mejor que el del método gráfico. Además, se logró identificar que la productividad del predictor de tasa de infiltración de Kostiakov fue el mejor entre los tres considerados para el área dada. (Zakwan, Muzzammil, & Alam, 2016).

6.1.9. Modelado de la permeabilidad del suelo utilizando diferentes algoritmos basados en datos basados en las propiedades físicas del suelo.

Este artículo científico abarca un tema preliminar sobre la importancia de la permeabilidad donde se explica que es la propiedad de construcción más imperiosa de los suelos; ya que esta se utiliza para comprender los procesos de drenaje, escorrentía, asentamiento e infiltración. (Singh Kumar, y otros, 2020).

Esto desencadena la posibilidad de que se den varias funciones hídricas e hidráulicas que se conocen hasta el momento, por las propiedades de filtración del suelo.

Esta investigación se realizó en tres fases; La primera fue la recolección de muestras de suelo de diferentes ubicaciones del terreno seleccionado, la segunda fue un análisis de pruebas en laboratorio, y la tercera fase fue el modelado de datos en donde se aplicaron cinco algoritmos diferentes que son: Máquina de vectores de soporte (SVM), sistema de inferencia neuro-difusa coactiva (CANFIS), perceptrón multicapa (MLP), algoritmos de bosque aleatorio (RF) y árbol de

decisión (DT) para la simulación de la permeabilidad del suelo, a partir de sus propiedades físicas. (Singh Kumar, y otros, 2020).

Es pertinente presentar una breve descripción de cada uno de los algoritmos mencionados, como se expone a continuación:

Algoritmo SVM: Es una técnica de aprendizaje supervisado que se aplica para solucionar el problema de predicción, reconocimiento de patrones, regresión y clasificación.

Algoritmo CANFIS: Es la forma combinada de un sistema difuso y un sistema neuronal artificial con capacidades rápidas y precisas.

Algoritmo MLP: Es un método de aprendizaje controlado que utiliza una conjugación de diferentes hiperparámetros que apoyan la aproximación de uniones complejas entre las entradas y salidas.

Algoritmo RF: Es una optimización adaptable, simplemente de hiperparámetros y un algoritmo de aprendizaje automático fácilmente aplicable para este tipo de problemáticas.

Algoritmo DT: Se emplea para la predicción de un objetivo por medio del aprendizaje de métodos de decisión. Además, también es utilizada para resolver la regresión y clasificación.

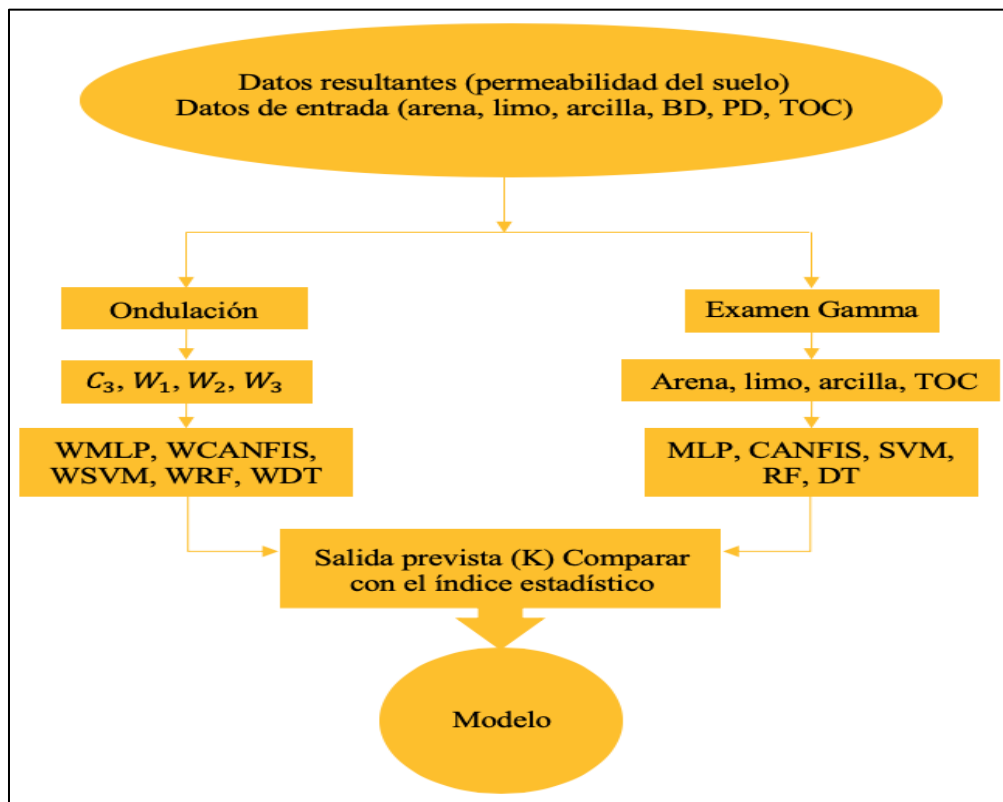


Figura 34 Diagrama de flujo del desarrollo del modelo.

Fuente: Extraída de (Singh Kumar, y otros, 2020).

Después de estudiar los resultados con la prueba gamma, se concluyó que los parámetros de arena, limo, arcilla son una combinación de entrada apropiada para la predicción de la permeabilidad del suelo. (Singh Kumar, y otros, 2020).

Finalmente, los autores (Singh Kumar, y otros, 2020) llegaron a la conclusión de que el algoritmo de RF es el de mejor rendimiento con alta precisión, eficiencia y adaptabilidad para la predicción de la permeabilidad del terreno basada en algoritmos wavelet y no wavelet.

6.1.10. Un estudio integrado de tomografía de resistividad eléctrica y método de infiltración para descifrar las características y potencialidades de la zona no saturada en roca cristalina.

Este último documento realizó un estudio para evaluar las condiciones del subsuelo poco profundo en un terreno granítico; para llevarlo a cabo, se realizaron tomografías de resistividad

eléctrica (ERT) y estudios de infiltración de doble anillo en la ciudad de Hyderabad, India. (Warsi, y otros, 2019).

Las respuestas de la ERT fueron monitoreadas continuamente con una matriz de Wenner y Schlumberger con una separación de electrodos de 1 m y 5 m. De igual manera, se realizó la prueba hidrogeológica en el mismo perfil del ERT para conseguir ilustraciones de la distribución de la resistividad del subsuelo. (Warsi, y otros, 2019).

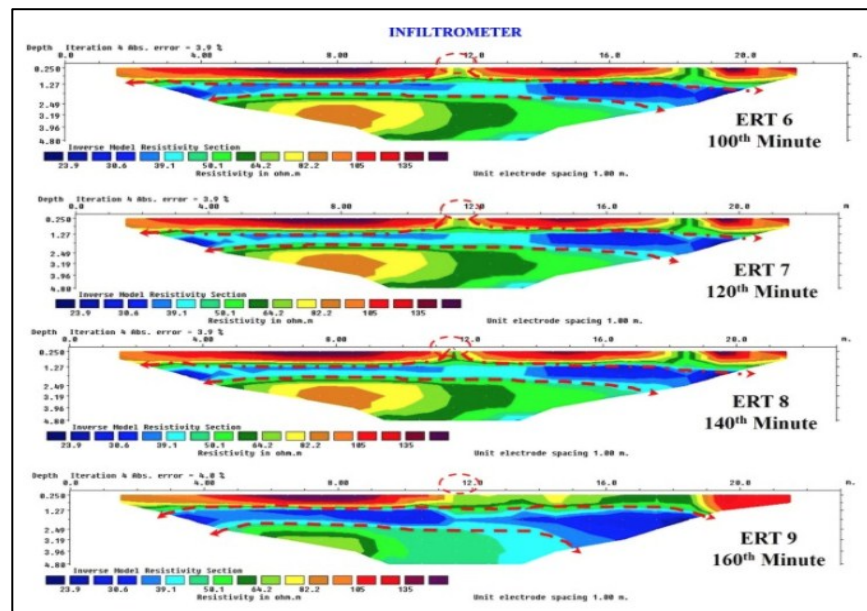


Figura 35 Sección invertida ERT en uno de los sitios estudiados que exhibe flujo de agua a través de zonas más débiles.

Fuente: Extraída de (Warsi, y otros, 2019).

Con este doble estudio a la zona, se obtiene por una parte las zonas que presentan alto riesgo de erosión y por el otro la velocidad con la que el agua se infiltra desde la capa superficial del terreno hasta el sector meteorizado subsuperficial. (Warsi, y otros, 2019).

Gracias a esto se logró analizar que la tasa de infiltración aumenta de manera gradual con respecto al tiempo, esto quiere decir, que el agua infiltrada fluye de manera lateral y no vertical como es frecuente, llegando así, a una profundidad de 17 metros y revela que el suelo puede estar conformado por juntas de láminas que juegan un papel vital como conductor de agua que crea un mejoramiento en la calidad y cantidad del agua subterránea. (Warsi, y otros, 2019).

Finalmente, se concluye que existe una posibilidad de una conexión entre las láminas y un acuífero lo cual puede ser un gran hallazgo para el documento científico. (Warsi, y otros, 2019).

7. Metodología

La metodología es el proceso en el que se presenta todo el proyecto de manera esquemática como se puede ver a continuación:

Búsqueda y recopilación de conocimientos e investigaciones referentes al tema

Para llevar a cabo el primer paso fue necesario:

- Consulta de temas que contribuyan a contextualizar a los lectores de la problemática impuesta.
- Estudio de referencias acerca de ecuaciones y modelos para hallar los parámetros de

infiltración de manera efectiva.

- Averiguar y obtener información de las características del suelo de la universidad Antonio Nariño sede Usme como datos de entrada.

Ejecución del trabajo

Este segundo paso es la ejecución de las ideas e hipótesis del autor, como se observa seguidamente:

- Delimitar la zona dentro de la universidad para tomarlo como referencia de toda la sede.
- Seleccionar las propiedades del suelo pertinentes a partir del tipo de material del terreno y los parámetros de inicio.
- Implementar una ecuación que permita conseguir los parámetros de infiltración.
- Hacer mapas de los parámetros del modelo

Resolución del proyecto de grado

Este paso es la exposición de los resultados del completo progreso de la monografía, en este caso:

- Presentación de la estimación de lineamientos de infiltración junto con sus respectivos mapas.
- Planteamiento de conclusiones a partir del desarrollo del documento.
- Generación de recomendaciones particulares para tener en cuenta.

8. Elaboración del trabajo y resultados

8.1. Delimitación de la zona

La sede de la Universidad Antonio Nariño que se analizó se encuentra ubicada en localidad de Usme, es decir, la número 5 del distrito capital de Bogotá. La localización exacta de la entrada está entre el río Tunjuelo y la quebrada Fucha como se muestra a continuación:

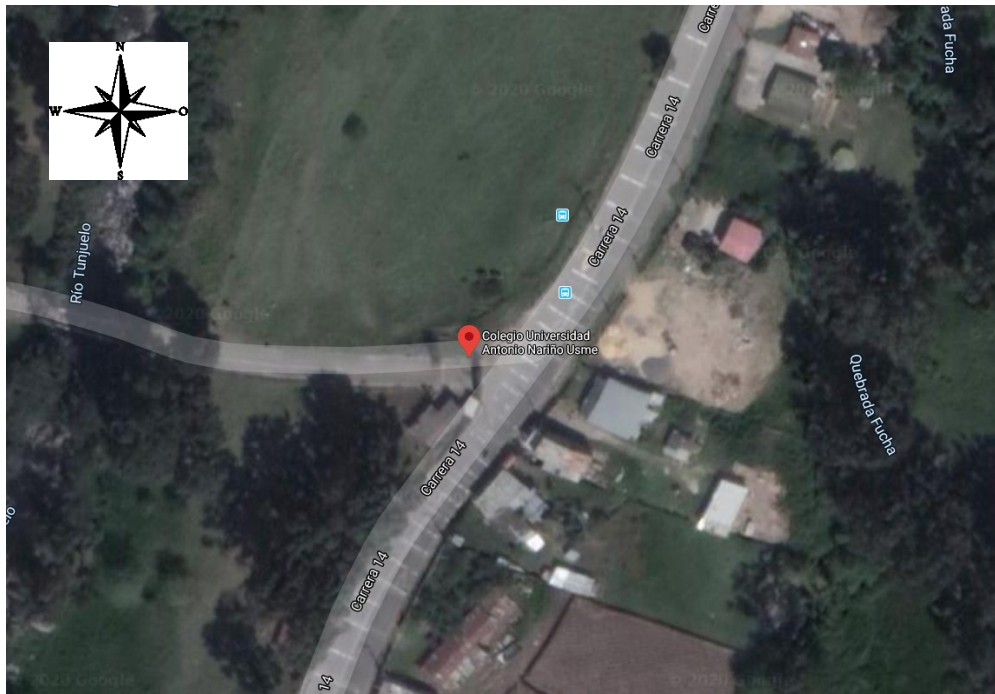


Figura 36 Ubicación de la Universidad Antonio Nariño sede Usme.

Fuente: Extraída de (Google Maps, 2020).

La zona cuenta con un área aproximada de 250.671 m^2 , en ella se encuentra una iglesia monasterio, un colegio de primaria para las familias que se encuentran cerca de la sede, además de cafeterías, baños, zona de parking, zona de cultivos y una estructura específica para estudios complementarios de medicina veterinaria.

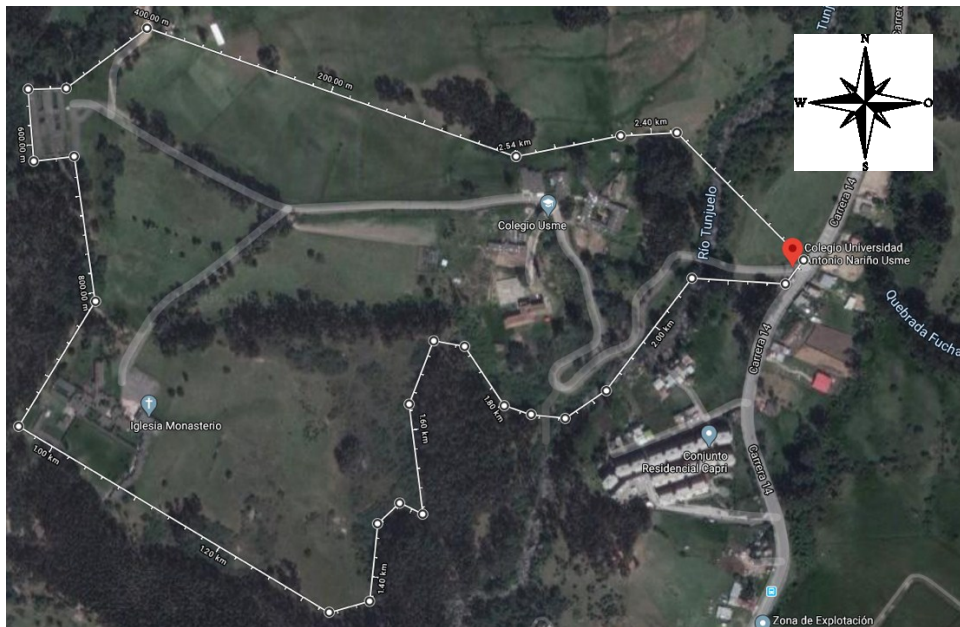


Figura 37 Vista de toda la sede de la Universidad Antonio Nariño.

Fuente: Extraída de (Google Maps, 2020).

Finalmente, como punto de referencia dentro de la universidad se tuvo en cuenta la zona de la figura 38, ya que se ha desarrollado anteriormente una tesis de una caracterización hidrogeológica allí por los autores (Quiroga Belalcázar & Vega Cárdenas, 2019); esta se presenta seguidamente:



Figura 38 Zona de la sede de la universidad a tener en cuenta por sus antiguos análisis.

Fuente: Extraída de (Google Maps, 2020).

Sin embargo, el área de estudio para esta tesis fue toda la demarcada en la figura 37, y se toma como referencia la figura 38 para corroborar la información que se analizó.

8.2. Obtención de características del suelo

Para conseguir las características del suelo como datos de entrada del modelo de infiltración, fue necesaria la implementación de un programa de libre acceso llamado SoilGrids 3D. Este sistema de información global permite estimar las características del sitio que se escoja, propiedades físicas y químicas del terreno y clasificaciones a diferentes taxonomías. En este caso particular, solo se centró en la clase de textura que tiene el suelo a profundidades máximas de 2 metros.



Figura 39 Vista previa de la sede Usme de la universidad en SoilGrids 3D.

Fuente: Extraída de (SoilGrids 3D, 2020).

Para tener una estimación muy aproximada a la realidad se realizaron análisis de arcilla, limo y arena a profundidades de 0 cm, 30 cm, 60 cm, 1 metro y 2 metros, la determinación final depende de la leyenda medida en porcentaje a partir de una opacidad de 0.7 como se muestra a continuación:

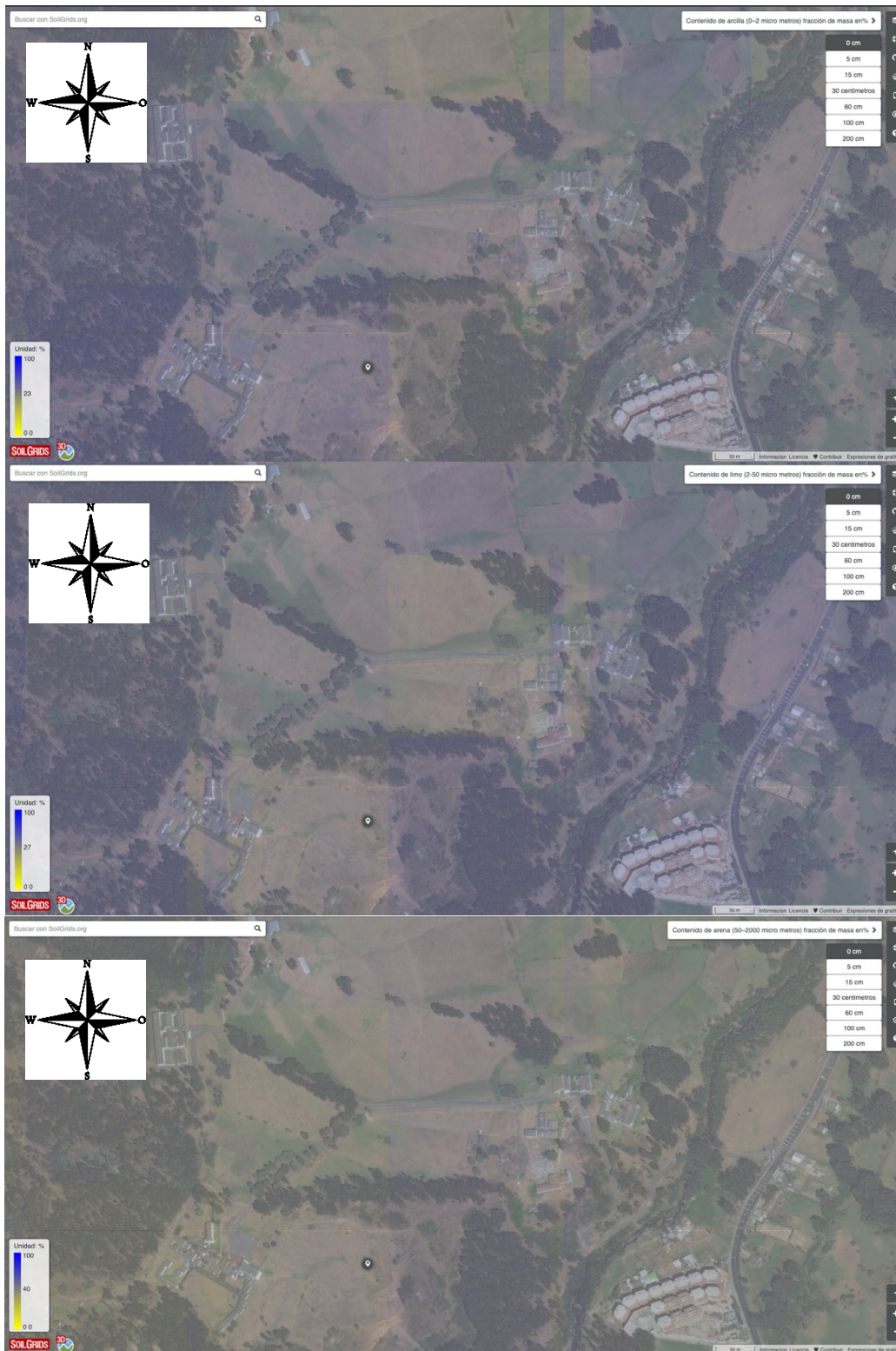


Figura 40 Análisis del suelo a una profundidad de 0 cm.

Fuente: Extraída de (SoilGrids 3D, 2020).

Como se evidencia en la figura 40 el análisis de cada uno de los píxeles en las diferentes imágenes de textura mostró que a una profundidad de 0 cm predomina el suelo **limo-arenoso**.

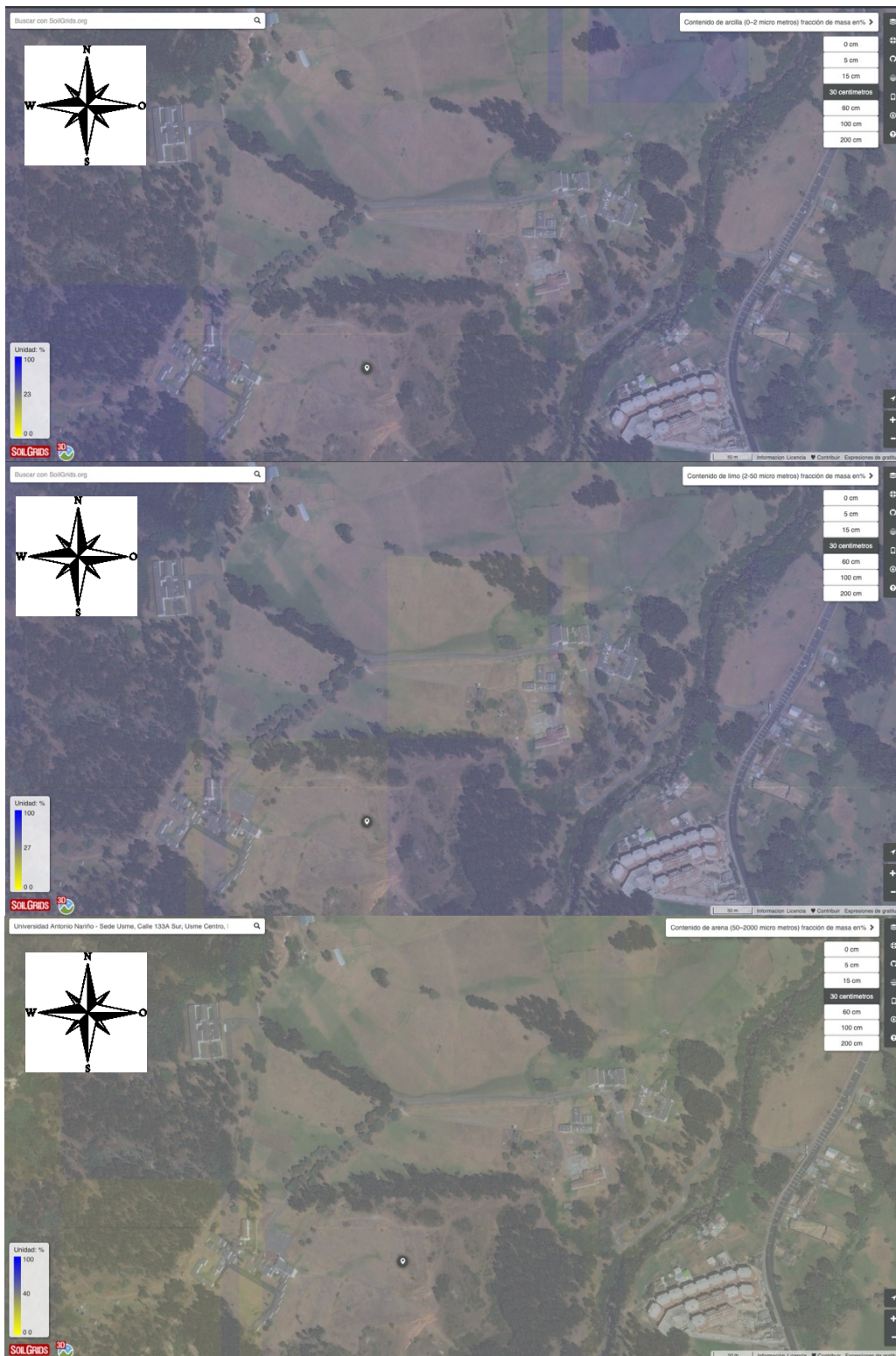


Figura 41 Análisis del suelo a una profundidad de 30 cm.

Fuente: Extraída de (SoilGrids 3D, 2020).

Para la figura 41 se hizo el análisis a una profundidad de 30 cm, dando como resultado un terreno **limo arcilloso arenoso**.

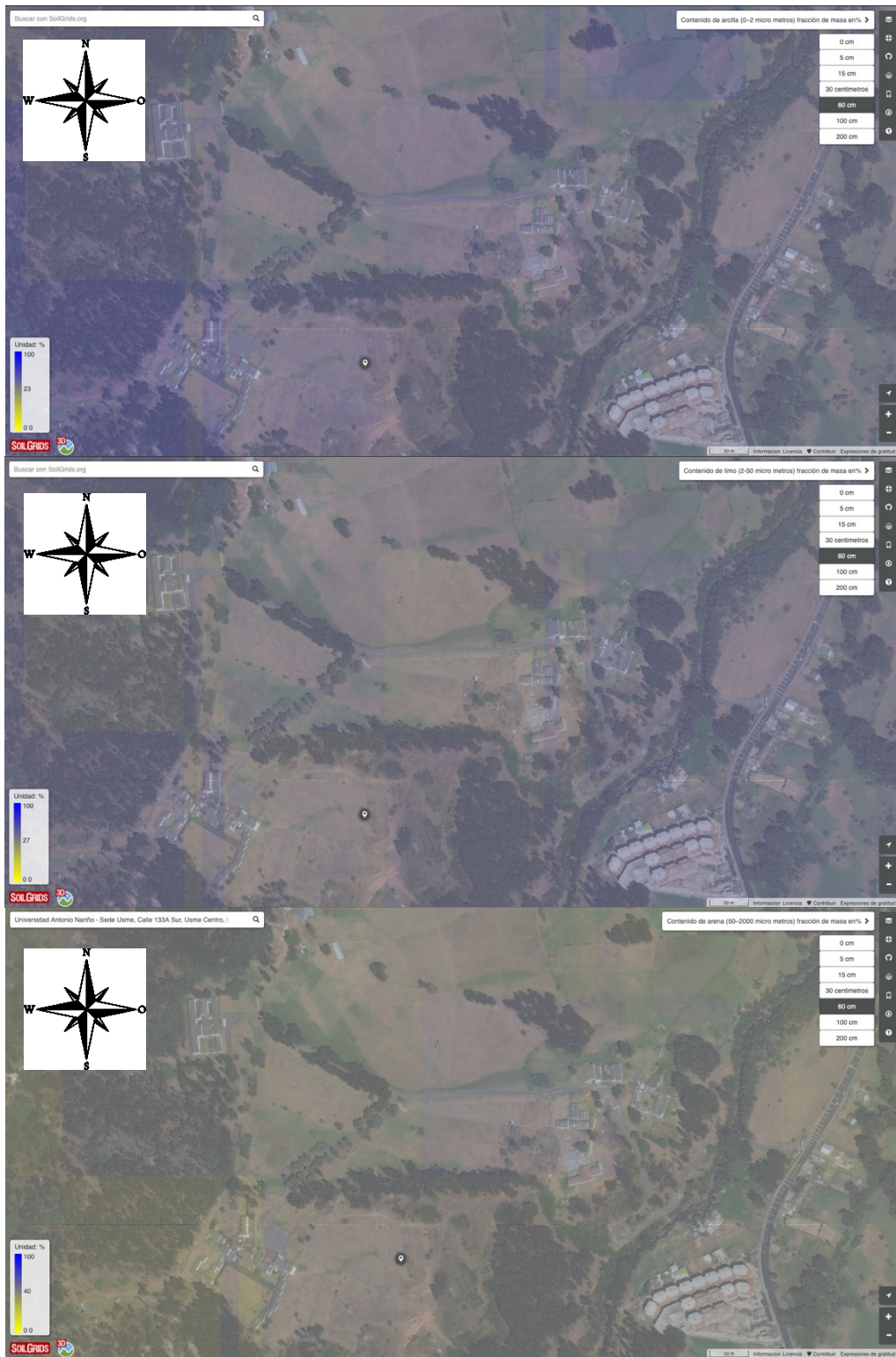


Figura 42 Análisis del suelo a una profundidad de 60 cm.

Fuente: Extraída de (SoilGrids 3D, 2020).

El estudio que se llevó a cabo en una profundidad de 60 cm dio como producto un terreno **arcillo arenoso**.



Figura 43 Análisis del suelo a una profundidad de 1 metro.

Fuente: Extraída de (SoilGrids 3D, 2020).

Así como en la anterior indagación del suelo; a profundidad de 1 metro se halló un terreno **arcillo arenoso.**

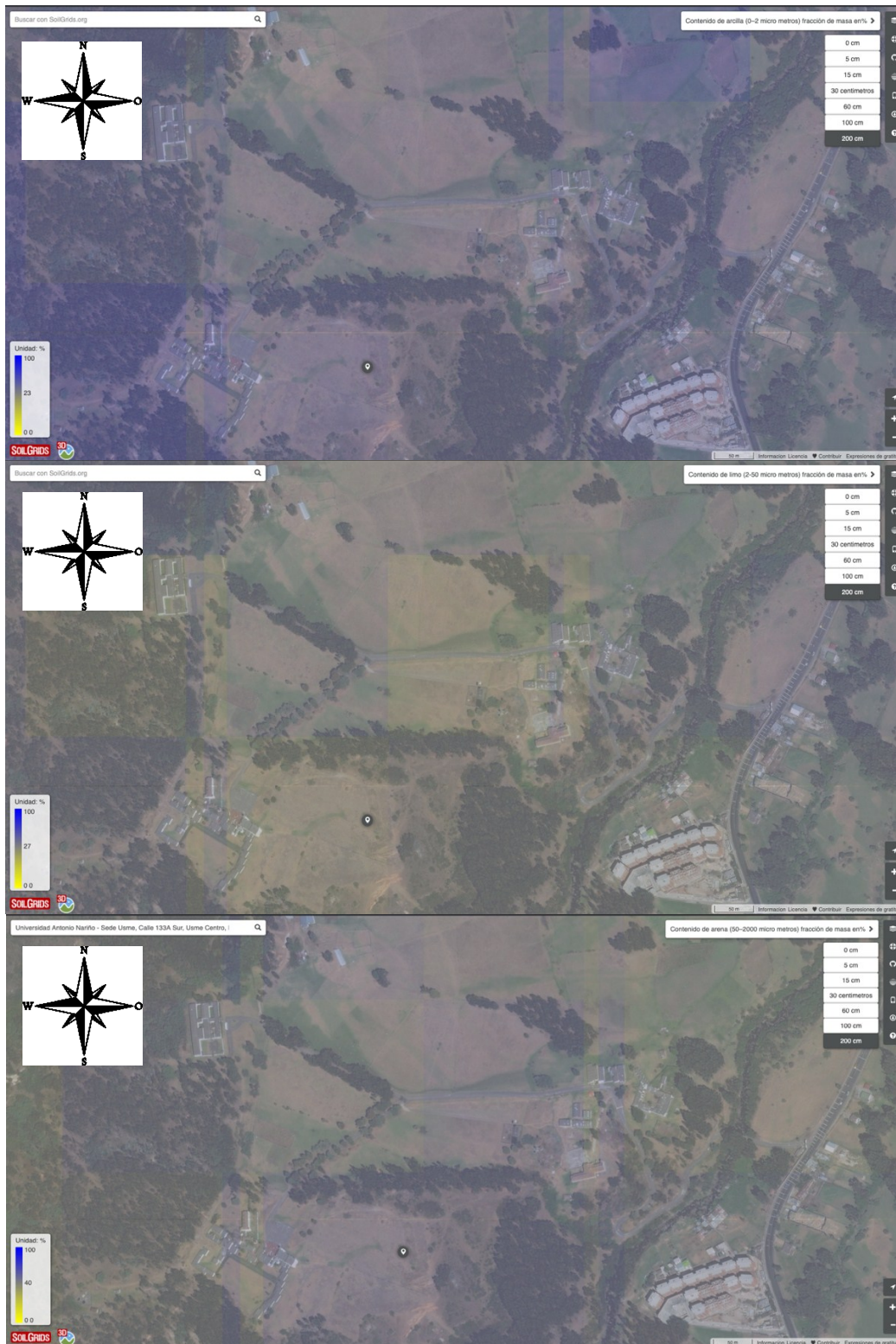


Figura 44 Análisis del suelo a una profundidad de 2 metros.

Fuente: Extraída de (SoilGrids 3D, 2020).

Por último, se efectuó una investigación a 2 metros de profundidad, generando un cambio de suelo ya que se detectó **arena arcillosa**.

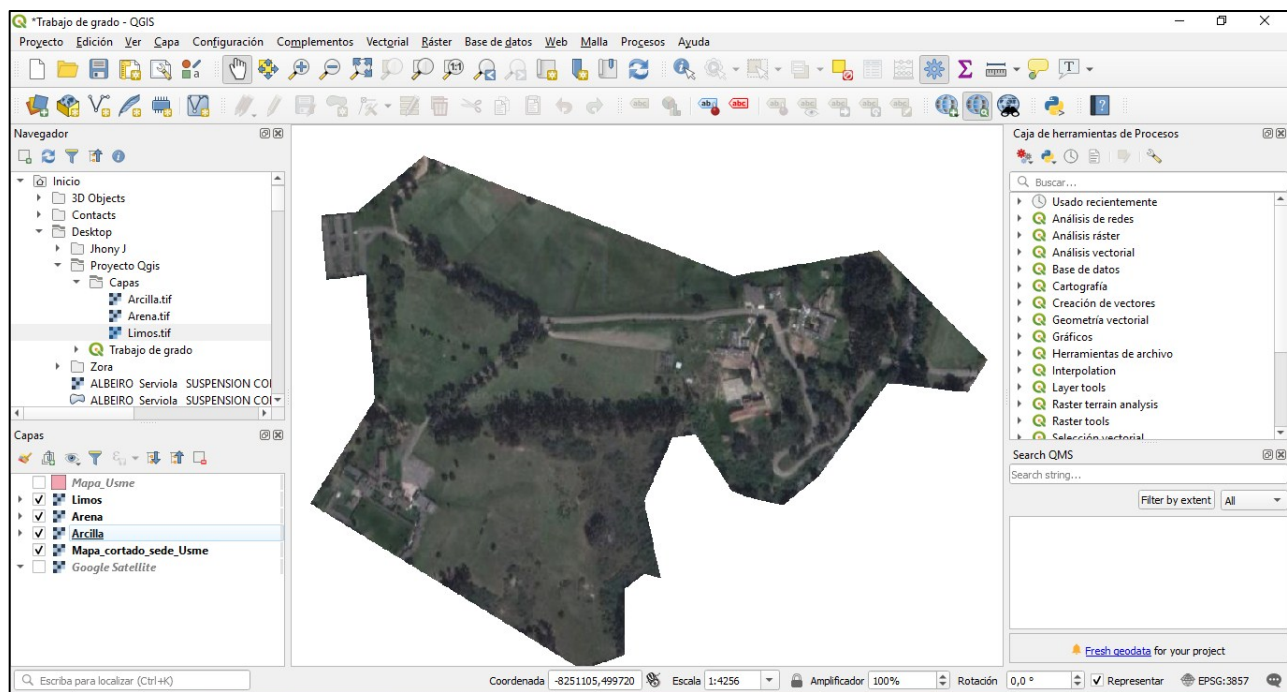


Figura 45 Mapa Qgis de la zona de estudio con la información de la textura de suelo

Fuente: Extraída de (OSGeoLive, s.f).

Por medio del programa SoilGrids250m se tomaron las coordenadas correspondientes a la Universidad Antonio Nariño sede Usme para descargar las capas Shapefile del contenido de arcillas, arenas y limos e implementarlos en la zona del mapa analizado en el programa Qgis como se muestra en la figura 45. De manera que, se demostró que al ser un sector tan pequeño de análisis sólo se encontró un píxel de información que corresponde a 322 g/Kg de contenido de arcillas, 340 g/Kg de contenido de arenas y 338 g/Kg de contenido de limos en la profundidad de 60 cm a 1 metro.

Esto se presenta como un punto complementario de información geográfica, además de un tema de indagación frente a programas de libre acceso que pueden brindar ayuda a problemáticas a fines.

8.3. Selección de parámetros de infiltración y uso de la ecuación Green – Ampt

Una vez conseguidos los datos de entrada, se tomaron los valores correspondientes de la porosidad, porosidad efectiva, presión capilar frontal húmeda y la conductividad hidráulica teniendo presente que el horizonte adecuado para el ejercicio es el B y por defecto se tomó el tamaño de la muestra. Recalcando de igual manera que, esta tabla que se verá a continuación de donde se adquieren la información, se rescató del artículo de los autores (Rawls, ASCE, Brakensiek, & Miller, 1983).

| Soil texture class (1) | Horizon (2) | Sample size (3) | Total porosity, ϕ , in cubic centimeters per cubic centimeters (4) | Effective porosity, θ_e , in cubic centimeters per cubic centimeters (5) | Wetted front capillary pressure, ψ_f , ^a in centimeters (6) | Hydraulic conductivity, K , ^b in centimeters per hour (7) |
|------------------------|-------------|-----------------|---|---|---|--|
| Sand ^c | A | 762 | 0.437 (0.374–0.500) ^d | 0.417 (0.354–0.480) | 4.95 (0.97–25.36) | 11.78 |
| | B | 370 | 0.452 (0.396–0.508) | 0.431 (0.375–0.487) | 5.34 (1.24–23.06) | |
| | C | 185 | 0.440 (0.385–0.495) | 0.421 (0.365–0.477) | 6.38 (1.31–31.06) | |
| Loamy sand | A | 127 | 0.424 (0.385–0.463) | 0.408 (0.365–0.451) | 2.07 (0.32–13.26) | 2.99 |
| | B | 338 | 0.437 (0.363–0.506) | 0.401 (0.329–0.473) | 6.13 (1.35–27.94) | |
| | C | 110 | 0.457 (0.385–0.529) | 0.424 (0.347–0.501) | 6.01 (1.58–22.87) | |
| Sandy loam | A | 49 | 0.447 (0.379–0.515) | 0.412 (0.334–0.490) | 4.21 (1.03–17.24) | 1.09 |
| | B | 36 | 0.424 (0.372–0.476) | 0.385 (0.323–0.447) | 5.16 (0.76–34.85) | |
| | C | 666 | 0.453 (0.351–0.555) | 0.412 (0.283–0.541) | 11.01 (2.67–45.47) | |
| Loam | A | 119 | 0.505 (0.399–0.611) | 0.469 (0.330–0.608) | 15.24 (5.56–41.76) | 0.34 |
| | B | 219 | 0.466 (0.352–0.580) | 0.428 (0.271–0.585) | 8.89 (2.02–39.06) | |
| | C | 66 | 0.418 (0.352–0.484) | 0.389 (0.310–0.468) | 6.79 (1.16–39.65) | |
| Silt loam | A | 76 | 0.512 (0.427–0.597) | 0.476 (0.376–0.576) | 10.01 (2.14–46.81) | 0.65 |
| | B | 67 | 0.512 (0.408–0.616) | 0.498 (0.382–0.614) | 6.40 (1.01–40.49) | |
| | C | 47 | 0.412 (0.350–0.474) | 0.382 (0.305–0.459) | 9.27 (0.87–99.29) | |
| Sandy clay loam | A | 1,206 | 0.501 (0.420–0.582) | 0.486 (0.394–0.578) | 16.68 (2.92–95.39) | 0.15 |
| | B | 361 | 0.527 (0.444–0.610) | 0.514 (0.425–0.603) | 10.91 (1.89–63.05) | |
| | C | 267 | 0.533 (0.430–0.636) | 0.515 (0.387–0.643) | 7.21 (0.86–60.82) | |
| Clay loam | A | 73 | 0.470 (0.409–0.531) | 0.460 (0.396–0.524) | 12.62 (3.94–40.45) | 0.10 |
| | B | 498 | 0.398 (0.332–0.464) | 0.330 (0.235–0.425) | 21.85 (4.42–108.0) | |
| | C | — ^e | — | — | — | |
| Silty clay loam | A | 198 | 0.393 (0.310–0.476) | 0.330 (0.223–0.437) | 26.10 (4.79–142.30) | 0.10 |
| | B | 32 | 0.407 (0.359–0.455) | 0.332 (0.251–0.413) | 23.90 (5.51–103.75) | |
| | C | 366 | 0.464 (0.409–0.519) | 0.309 (0.279–0.501) | 20.88 (4.79–91.10) | |
| Sandy clay | A | 28 | 0.497 (0.434–0.560) | 0.430 (0.328–0.532) | 27.00 (6.13–118.9) | 0.10 |
| | B | 99 | 0.451 (0.401–0.501) | 0.397 (0.228–0.530) | 18.52 (4.36–78.73) | |
| | C | 55 | 0.452 (0.412–0.492) | 0.400 (0.320–0.480) | 15.21 (3.79–61.01) | |
| Silty clay | A | 689 | 0.471 (0.418–0.524) | 0.432 (0.347–0.517) | 27.30 (5.67–131.50) | 0.06 |
| | B | 65 | 0.509 (0.449–0.569) | 0.477 (0.410–0.544) | 13.97 (4.20–46.53) | |
| | C | 191 | 0.469 (0.423–0.515) | 0.441 (0.374–0.508) | 18.56 (4.08–84.44) | |
| Silty clay | A | 39 | 0.475 (0.436–0.514) | 0.451 (0.386–0.516) | 21.54 (4.56–101.7) | 0.05 |
| | B | 45 | 0.430 (0.370–0.490) | 0.321 (0.207–0.435) | 23.90 (4.08–140.2) | |
| | C | — | — | — | — | |
| Clay | A | 23 | 0.435 (0.371–0.499) | 0.335 (0.220–0.450) | 36.74 (8.33–162.1) | 0.03 |
| | B | — | — | — | — | |
| | C | 127 | 0.479 (0.425–0.533) | 0.423 (0.334–0.512) | 29.22 (6.13–139.4) | |
| Clay | A | — | — | — | — | 0.03 |
| | B | 38 | 0.476 (0.445–0.507) | 0.424 (0.345–0.503) | 30.66 (7.15–131.5) | |
| | C | 21 | 0.464 (0.430–0.498) | 0.416 (0.346–0.486) | 45.65 (18.27–114.1) | |
| Clay | A | 291 | 0.475 (0.427–0.523) | 0.385 (0.269–0.501) | 31.63 (6.39–156.5) | 0.03 |
| | B | — | — | — | — | |
| | C | 70 | 0.470 (0.426–0.514) | 0.412 (0.309–0.515) | 27.72 (6.21–123.7) | |
| Clay | A | 23 | 0.483 (0.441–0.525) | 0.419 (0.294–0.544) | 54.65 (10.59–282.0) | 0.03 |
| | B | — | — | — | — | |
| | C | — | — | — | — | |

Figura 6 Parámetros Green-Ampt según clases de textura del suelo y sus respectivos horizontes.

Fuente: Extraída de (Rawls, ASCE, Brakensiek, & Miller, 1983).

Acto seguido, se relacionaron todas las clases de texturas halladas en el suelo estudiado con la figura 6 de los parámetros Green-Ampt. Todo esto con la intención de hacer uso de la ecuación del mismo modelo tomado, como se muestra seguidamente:

$$F(t) = Kt + \psi\Delta\theta \ln\left(1 + \frac{F(t)}{\psi\Delta\theta}\right)$$

Figura 46 Ecuación Green Ampt despejada para hallar la infiltración acumulada.

Fuente: Extraída de (Rawls, ASCE, Brakensiek, & Miller, 1983).

Donde F es la infiltración acumulada como dato fundamental para conseguir la tasa de infiltración, K es la conductividad hidráulica, t es el tiempo en el que la infiltración acumulada aparece. Por razones de estimación se consideró este valor como 1 hora, ψ es la capilaridad en el frente mojado y $\Delta\theta$ es la variación de la humedad; este dato se halla de la siguiente manera:

$$\Delta\theta = (1 - S_e)\theta_e$$

Figura 47 Fórmula para conseguir la variación de la humedad.

Fuente: Extraída de (Fuentes Russi, 2018).

Para entender la fórmula se debe tener en cuenta que θ_e es la porosidad efectiva de los terrenos seleccionados y S_e es la saturación efectiva de estos mismos, la cual se obtiene así:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\eta - \theta_r} = \frac{\text{humedad disponible}}{\text{max. contenido de humedad posible}}$$

Figura 48 Fórmula para encontrar la saturación efectiva.

Fuente: Extraída de (Fuentes Russi, 2018).

θ_r es el contenido residual de humedad luego de haberse drenado el suelo y θ es el contenido de humedad, despejando la siguiente fórmula es posible obtener θ_r :

$$\theta_e = \eta - \theta_r$$

Figura 49 Fórmula para adquirir el contenido residual de humedad.

Fuente: Extraída de (Fuentes Russi, 2018).

Se debe tener en cuenta que η es la porosidad.

Finalmente, con el desarrollo de estas ecuaciones se tuvieron todos los términos necesarios para encontrar la tasa de infiltración a diferentes profundidades del suelo.

$$f = K \left(1 + \frac{n \psi_f}{F} \right)$$

Figura 50 Fórmula Green-Ampt de la tasa de infiltración.

Fuente: Extraída de (Rawls, ASCE, Brakensiek, & Miller, 1983).

1) Profundidad de 0 cm

Clase de textura del suelo: limo-arenoso.

Horizonte: B.

Tamaño de la muestra: 219

Porosidad total, en centímetros cúbicos por centímetros cúbicos: 0.466

Porosidad efectiva, en centímetros cúbicos por centímetros cúbicos: 0.428

Presión capilar frontal húmeda, en centímetros: 8.89

Conductividad hidráulica, en centímetros por hora: 1.09

Contenido de humedad: 30%

$$\theta_e = \eta - \theta_r$$

$$\theta_r = 0.466 - 0.428 = 0.038$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\eta - \theta_r}$$

$$S_e = \frac{0.3 - 0.038}{0.466 - 0.038} = 0.61$$

$$\Delta\theta = (1 - S_e)\theta_e$$

$$\Delta\theta = (1 - 0.61)0.428 = 0.17$$

$$F(t) = Kt + \psi\Delta\theta \ln\left(1 + \frac{F(t)}{\psi\Delta\theta}\right)$$

$$F(t) = (1.09)(1) + 8.89(0.17) \ln \left(1 + \frac{(1.09)}{8.89(0.17)} \right) = 1.91$$

Para el desarrollo de la ecuación de infiltración acumulada se tomó $Kt = F(t)$ como un valor base y comenzar a iterar hasta dar con el resultado que converga en el mismo valor como se muestra a continuación:

$$F(t) = (1.09)(1) + 8.89(0.17) \ln \left(1 + \frac{(1.91)}{8.89(0.17)} \right) = 2.32$$

$$F(t) = (1.09)(1) + 8.89(0.17) \ln \left(1 + \frac{(2.32)}{8.89(0.17)} \right) = 2.49$$

$$F(t) = (1.09)(1) + 8.89(0.17) \ln \left(1 + \frac{(2.49)}{8.89(0.17)} \right) = 2.56$$

$$F(t) = (1.09)(1) + 8.89(0.17) \ln \left(1 + \frac{(2.56)}{8.89(0.17)} \right) = 2.58$$

$$F(t) = (1.09)(1) + 8.89(0.17) \ln \left(1 + \frac{(2.58)}{8.89(0.17)} \right) = 2.60$$

$$F(t) = (1.09)(1) + 8.89(0.17) \ln \left(1 + \frac{(2.60)}{8.89(0.17)} \right) = \mathbf{2.60}$$

$$f = K \left(1 + \frac{\psi \Delta \theta}{F} \right)$$

$$f = 1.09 \left(1 + \frac{8.89(0.17)}{2.60} \right) = \mathbf{1.72}$$

Acto seguido, se realiza el mismo proceso para las diferentes profundidades.

2) Profundidad de 30 cm

Clase de textura del suelo: limo-arcilloso -arenoso.

Horizonte: B.

Tamaño de la muestra: 198

Porosidad total, en centímetros cúbicos por centímetros cúbicos: 0.393

Porosidad efectiva, en centímetros cúbicos por centímetros cúbicos: 0.330

Presión capilar frontal húmeda, en centímetros: 26.10

Conductividad hidráulica, en centímetros por hora: 0.15

Contenido de humedad: 30%

$$\theta_e = \eta - \theta_r$$

$$\theta_r = 0.393 - 0.330 = 0.063$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\eta - \theta_r}$$

$$S_e = \frac{0.3 - 0.063}{0.393 - 0.063} = 0.72$$

$$\Delta\theta = (1 - S_e)\theta_e$$

$$\Delta\theta = (1 - 0.72)0.330 = 0.0924$$

$$F(t) = Kt + \psi\Delta\theta \ln\left(1 + \frac{F(t)}{\psi\Delta\theta}\right)$$

$$F(t) = (0.15)(1) + 26.10(0.0924)\ln\left(1 + \frac{(0.15)}{26.10(0.0924)}\right) = 0.30$$

$$F(t) = (0.15)(1) + 26.10(0.0924)\ln\left(1 + \frac{(0.30)}{26.10(0.0924)}\right) = 0.45$$

$$F(t) = (0.15)(1) + 26.10(0.0924)\ln\left(1 + \frac{(0.45)}{26.10(0.0924)}\right) = 0.56$$

$$F(t) = (0.15)(1) + 26.10(0.0924)\ln\left(1 + \frac{(0.56)}{26.10(0.0924)}\right) = 0.67$$

$$F(t) = (0.15)(1) + 26.10(0.0924)\ln\left(1 + \frac{(0.67)}{26.10(0.0924)}\right) = 0.75$$

$$F(t) = (0.15)(1) + 26.10(0.0924)\ln\left(1 + \frac{(0.75)}{26.10(0.0924)}\right) = 0.81$$

$$F(t) = (0.15)(1) + 26.10(0.0924)\ln\left(1 + \frac{(0.81)}{26.10(0.0924)}\right) = 0.85$$

$$F(t) = (0.15)(1) + 26.10(0.0924)\ln\left(1 + \frac{(0.85)}{26.10(0.0924)}\right) = 0.89$$

$$F(t) = (0.15)(1) + 26.10(0.0924)\ln\left(1 + \frac{(0.89)}{26.10(0.0924)}\right) = 0.91$$

$$F(t) = (0.15)(1) + 26.10(0.0924)\ln\left(1 + \frac{(0.91)}{26.10(0.0924)}\right) = 0.93$$

$$F(t) = (0.15)(1) + 26.10(0.0924)\ln\left(1 + \frac{(0.93)}{26.10(0.0924)}\right) = 0.95$$

$$F(t) = (0.15)(1) + 26.10(0.0924)\ln\left(1 + \frac{(0.95)}{26.10(0.0924)}\right) = \mathbf{0.95}$$

$$f = K\left(1 + \frac{\psi\Delta\theta}{F}\right)$$

$$f = 0.15\left(1 + \frac{26.10(0.0924)}{0.95}\right) = \mathbf{0.53}$$

3) Profundidad de 60 cm

Clase de textura del suelo: arcillo-arenoso.

Horizonte: B.

Tamaño de la muestra: 23

Porosidad total, en centímetros cúbicos por centímetros cúbicos: 0.435

Porosidad efectiva, en centímetros cúbicos por centímetros cúbicos: 0.335

Presión capilar frontal húmeda, en centímetros: 36.74

Conductividad hidráulica, en centímetros por hora: 0.06

Contenido de humedad: 30%

$$\theta_e = \eta - \theta_r$$

$$\theta_r = 0.435 - 0.335 = 0.1$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\eta - \theta_r}$$

$$S_e = \frac{0.3 - 0.1}{0.435 - 0.1} = 0.60$$

$$\Delta\theta = (1 - S_e)\theta_e$$

$$\Delta\theta = (1 - 0.60)0.335 = 0.134$$

$$F(t) = Kt + \psi\Delta\theta \ln\left(1 + \frac{F(t)}{\psi\Delta\theta}\right)$$

$$F(t) = (0.06)(1) + 36.74(0.134)\ln\left(1 + \frac{(0.06)}{36.74(0.134)}\right) = 0.12$$

$$F(t) = (0.06)(1) + 36.74(0.134)\ln\left(1 + \frac{(0.12)}{36.74(0.134)}\right) = 0.18$$

$$F(t) = (0.06)(1) + 36.74(0.134)\ln\left(1 + \frac{(0.18)}{36.74(0.134)}\right) = 0.24$$

$$F(t) = (0.06)(1) + 36.74(0.134)\ln\left(1 + \frac{(0.24)}{36.74(0.134)}\right) = 0.29$$

$$F(t) = (0.06)(1) + 36.74(0.134)\ln\left(1 + \frac{(0.29)}{36.74(0.134)}\right) = 0.34$$

$$F(t) = (0.06)(1) + 36.74(0.134)\ln\left(1 + \frac{(0.34)}{36.74(0.134)}\right) = 0.39$$

$$F(t) = (0.06)(1) + 36.74(0.134)\ln\left(1 + \frac{(0.39)}{36.74(0.134)}\right) = 0.44$$

$$F(t) = (0.06)(1) + 36.74(0.134)\ln\left(1 + \frac{(0.44)}{36.74(0.134)}\right) = 0.48$$

$$F(t) = (0.06)(1) + 36.74(0.134)\ln\left(1 + \frac{(0.48)}{36.74(0.134)}\right) = 0.52$$

$$F(t) = (0.06)(1) + 36.74(0.134)\ln\left(1 + \frac{(0.52)}{36.74(0.134)}\right) = 0.55$$

$$F(t) = (0.06)(1) + 36.74(0.134)\ln\left(1 + \frac{(0.55)}{36.74(0.134)}\right) = 0.58$$

$$F(t) = (0.06)(1) + 36.74(0.134)\ln\left(1 + \frac{(0.58)}{36.74(0.134)}\right) = 0.61$$

$$F(t) = (0.06)(1) + 36.74(0.134)\ln\left(1 + \frac{(0.61)}{36.74(0.134)}\right) = 0.64$$

$$F(t) = (0.06)(1) + 36.74(0.134)\ln\left(1 + \frac{(0.64)}{36.74(0.134)}\right) = 0.66$$

$$F(t) = (0.06)(1) + 36.74(0.134)\ln\left(1 + \frac{(0.66)}{36.74(0.134)}\right) = 0.68$$

$$F(t) = (0.06)(1) + 36.74(0.134)\ln\left(1 + \frac{(0.68)}{36.74(0.134)}\right) = 0.70$$

$$F(t) = (0.06)(1) + 36.74(0.134)\ln\left(1 + \frac{(0.70)}{36.74(0.134)}\right) = 0.71$$

$$F(t) = (0.06)(1) + 36.74(0.134)\ln\left(1 + \frac{(0.71)}{36.74(0.134)}\right) = 0.72$$

$$F(t) = (0.06)(1) + 36.74(0.134)\ln\left(1 + \frac{(0.72)}{36.74(0.134)}\right) = 0.73$$

$$F(t) = (0.06)(1) + 36.74(0.134)\ln\left(1 + \frac{(0.73)}{36.74(0.134)}\right) = 0.74$$

$$F(t) = (0.06)(1) + 36.74(0.134)\ln\left(1 + \frac{(0.74)}{36.74(0.134)}\right) = 0.75$$

$$F(t) = (0.06)(1) + 36.74(0.134)\ln\left(1 + \frac{(0.75)}{36.74(0.134)}\right) = 0.76$$

$$F(t) = (0.06)(1) + 36.74(0.134)\ln\left(1 + \frac{(0.76)}{36.74(0.134)}\right) = 0.77$$

$$F(t) = (0.06)(1) + 36.74(0.134)\ln\left(1 + \frac{(0.77)}{36.74(0.134)}\right) = 0.78$$

$$F(t) = (0.06)(1) + 36.74(0.134)\ln\left(1 + \frac{(0.78)}{36.74(0.134)}\right) = 0.79$$

$$F(t) = (0.06)(1) + 36.74(0.134)\ln\left(1 + \frac{(0.79)}{36.74(0.134)}\right) = 0.80$$

$$F(t) = (0.06)(1) + 36.74(0.134)\ln\left(1 + \frac{(0.80)}{36.74(0.134)}\right) = \mathbf{0.80}$$

$$f = K\left(1 + \frac{\psi\Delta\theta}{F}\right)$$

$$f = 0.06\left(1 + \frac{36.74(0.134)}{0.80}\right) = \mathbf{0.43}$$

4) Profundidad de 100 cm

Clase de textura del suelo: arcillo-arenoso.

Horizonte: B.

Tamaño de la muestra: 23

Porosidad total, en centímetros cúbicos por centímetros cúbicos: 0.435

Porosidad efectiva, en centímetros cúbicos por centímetros cúbicos: 0.335

Presión capilar frontal húmeda, en centímetros: 36.74

Conductividad hidráulica, en centímetros por hora: 0.06

Contenido de humedad: 30%

$$\theta_e = \eta - \theta_r$$

$$\theta_r = 0.435 - 0.335 = 0.1$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\eta - \theta_r}$$

$$S_e = \frac{0.3 - 0.1}{0.435 - 0.1} = 0.60$$

$$\Delta\theta = (1 - S_e)\theta_e$$

$$\Delta\theta = (1 - 0.60)0.335 = 0.134$$

$$F(t) = Kt + \psi\Delta\theta \ln\left(1 + \frac{F(t)}{\psi\Delta\theta}\right)$$

$$F(t) = (0.06)(1) + 36.74(0.134)\ln\left(1 + \frac{(0.06)}{36.74(0.134)}\right) = 0.12$$

$$F(t) = (0.06)(1) + 36.74(0.134)\ln\left(1 + \frac{(0.12)}{36.74(0.134)}\right) = 0.18$$

$$F(t) = (0.06)(1) + 36.74(0.134)\ln\left(1 + \frac{(0.18)}{36.74(0.134)}\right) = 0.24$$

$$F(t) = (0.06)(1) + 36.74(0.134)\ln\left(1 + \frac{(0.24)}{36.74(0.134)}\right) = 0.29$$

$$F(t) = (0.06)(1) + 36.74(0.134)\ln\left(1 + \frac{(0.29)}{36.74(0.134)}\right) = 0.34$$

$$F(t) = (0.06)(1) + 36.74(0.134)\ln\left(1 + \frac{(0.34)}{36.74(0.134)}\right) = 0.39$$

$$F(t) = (0.06)(1) + 36.74(0.134)\ln\left(1 + \frac{(0.39)}{36.74(0.134)}\right) = 0.44$$

$$F(t) = (0.06)(1) + 36.74(0.134)\ln\left(1 + \frac{(0.44)}{36.74(0.134)}\right) = 0.48$$

$$F(t) = (0.06)(1) + 36.74(0.134)\ln\left(1 + \frac{(0.48)}{36.74(0.134)}\right) = 0.52$$

$$F(t) = (0.06)(1) + 36.74(0.134)\ln\left(1 + \frac{(0.52)}{36.74(0.134)}\right) = 0.55$$

$$F(t) = (0.06)(1) + 36.74(0.134)\ln\left(1 + \frac{(0.55)}{36.74(0.134)}\right) = 0.58$$

$$F(t) = (0.06)(1) + 36.74(0.134)\ln\left(1 + \frac{(0.58)}{36.74(0.134)}\right) = 0.61$$

$$F(t) = (0.06)(1) + 36.74(0.134)\ln\left(1 + \frac{(0.61)}{36.74(0.134)}\right) = 0.64$$

$$F(t) = (0.06)(1) + 36.74(0.134)\ln\left(1 + \frac{(0.64)}{36.74(0.134)}\right) = 0.66$$

$$F(t) = (0.06)(1) + 36.74(0.134)\ln\left(1 + \frac{(0.66)}{36.74(0.134)}\right) = 0.68$$

$$F(t) = (0.06)(1) + 36.74(0.134)\ln\left(1 + \frac{(0.68)}{36.74(0.134)}\right) = 0.70$$

$$F(t) = (0.06)(1) + 36.74(0.134)\ln\left(1 + \frac{(0.70)}{36.74(0.134)}\right) = 0.71$$

$$F(t) = (0.06)(1) + 36.74(0.134)\ln\left(1 + \frac{(0.71)}{36.74(0.134)}\right) = 0.72$$

$$F(t) = (0.06)(1) + 36.74(0.134)\ln\left(1 + \frac{(0.72)}{36.74(0.134)}\right) = 0.73$$

$$F(t) = (0.06)(1) + 36.74(0.134)\ln\left(1 + \frac{(0.73)}{36.74(0.134)}\right) = 0.74$$

$$F(t) = (0.06)(1) + 36.74(0.134)\ln\left(1 + \frac{(0.74)}{36.74(0.134)}\right) = 0.75$$

$$F(t) = (0.06)(1) + 36.74(0.134)\ln\left(1 + \frac{(0.75)}{36.74(0.134)}\right) = 0.76$$

$$F(t) = (0.06)(1) + 36.74(0.134)\ln\left(1 + \frac{(0.76)}{36.74(0.134)}\right) = 0.77$$

$$F(t) = (0.06)(1) + 36.74(0.134)\ln\left(1 + \frac{(0.77)}{36.74(0.134)}\right) = 0.78$$

$$F(t) = (0.06)(1) + 36.74(0.134)\ln\left(1 + \frac{(0.78)}{36.74(0.134)}\right) = 0.79$$

$$F(t) = (0.06)(1) + 36.74(0.134)\ln\left(1 + \frac{(0.79)}{36.74(0.134)}\right) = 0.80$$

$$F(t) = (0.06)(1) + 36.74(0.134)\ln\left(1 + \frac{(0.80)}{36.74(0.134)}\right) = \mathbf{0.80}$$

$$f = K\left(1 + \frac{\psi\Delta\theta}{F}\right)$$

$$f = 0.06\left(1 + \frac{36.74(0.134)}{0.80}\right) = \mathbf{0.43}$$

5) Profundidad de 200 cm

Clase de textura del suelo: arena-arcillosa.

Horizonte: B.

Tamaño de la muestra: 49

Porosidad total, en centímetros cúbicos por centímetros cúbicos: 0.447

Porosidad efectiva, en centímetros cúbicos por centímetros cúbicos: 0.412

Presión capilar frontal húmeda, en centímetros: 4.21

Conductividad hidráulica, en centímetros por hora: 2.99

Contenido de humedad: 30%

$$\theta_e = \eta - \theta_r$$

$$\theta_r = 0.447 - 0.412 = 0.035$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\eta - \theta_r}$$

$$S_e = \frac{0.3 - 0.035}{0.447 - 0.035} = 0.64$$

$$\Delta\theta = (1 - S_e)\theta_e$$

$$\Delta\theta = (1 - 0.64)0.412 = 0.15$$

$$F(t) = Kt + \psi\Delta\theta \ln\left(1 + \frac{F(t)}{\psi\Delta\theta}\right)$$

$$F(t) = (2.99)(1) + 4.21(0.15)\ln\left(1 + \frac{(2.99)}{4.21(0.15)}\right) = 4.09$$

$$F(t) = (2.99)(1) + 4.21(0.15)\ln\left(1 + \frac{(4.09)}{4.21(0.15)}\right) = 4.26$$

$$F(t) = (2.99)(1) + 4.21(0.15)\ln\left(1 + \frac{(4.26)}{4.21(0.15)}\right) = 4.28$$

$$F(t) = (2.99)(1) + 4.21(0.15)\ln\left(1 + \frac{(4.28)}{4.21(0.15)}\right) = \mathbf{4.28}$$

$$f = K \left(1 + \frac{\psi \Delta \theta}{F} \right)$$

$$f = 2.99 \left(1 + \frac{4.21(0.15)}{4.28} \right) = 3.43$$

Tabla 3 Resultados teóricos de los parámetros de infiltración.

| Textura | Profundidad (cm) | Infiltración acumulada (cm) | Infiltración acumulada (mm) | Tasa de Infiltración (cm/h) | Tasa de infiltración (mm/h) |
|------------------------|-------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Limo-arenoso | 0 | 2.60 | 26 | 1.72 | 17.2 |
| Limo-arcilloso-arenoso | 30 | 0.95 | 9.5 | 0.53 | 5.3 |
| Arcillo-arenoso | 60 | 0.80 | 8.0 | 0.43 | 4.3 |
| Arcillo-arenoso | 100 | 0.80 | 8.0 | 0.43 | 4.3 |
| Arena-arcillosa | 200 | 4.28 | 42.8 | 3.43 | 34.3 |

Fuente: Elaboración Propia (2020).

A partir de los datos obtenidos de manera teórica y manual, se comparó con un programa que evalúa el modelo de infiltración Green-Ampt de manera automática y exacta.

Cabe mencionar que se realizaron estudios a 5 profundidades distintas para tener un rango de estudio considerable para el análisis de infiltración en los distintos tipos de textura del suelo.

Antes de ejecutar este paralelo, se hizo necesario partir de un dato de análisis de lluvia, ya que con este término inicial se puede encontrar el tiempo de encharcamiento y la profundidad de agua infiltrada. La (Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., 2018) realizó un estudio donde se concluyó que la precipitación promedio anual en Usme varía entre los 800 a 1000 mm.

Con este hallazgo, se puede entender que, basados en una estimación, la intensidad de lluvia generaría 3.47 cm/h o 34.7 mm/h. Consecuentemente, se lleva a cabo el uso del programa (Rivadeneira Erazo, 2013):

A) Profundidad de 0 cm

INFILTRACIÓN MODELO GREEN AMPT

[DESCARGAR MANUAL](#)

[VIDEO TUTORIAL](#)

DATOS

MOSTRAR TABLA

| | | |
|---------------------------------------|------------------------------------|----------|
| POROSIDAD EFECTIVA | <input type="text" value="0.428"/> | Tanto x1 |
| POROSIDAD | <input type="text" value="0.466"/> | Tanto X1 |
| CABEZA DE SUCCIÓN EN EL FRENTE MOJADO | <input type="text" value="8.89"/> | cm |
| CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (K) | <input type="text" value="1.09"/> | cm/hr |
| TIEMPO | <input type="text" value="1"/> | Horas |
| SATURACIÓN EFECTIVA S_e | <input type="text" value="0.61"/> | Tanto x1 |



Este modelo requiere estimaciones de la Conductividad Hidráulica (K), de la Porosidad (n) y de la Cabeza de Succión del Suelo en el Frente Mojado, esto lo podemos hacer mediante la siguiente tabla

[CALCULAR](#)

[EJEMPLO](#)

[LIMPIAR](#)

RESULTADOS

| | | |
|--|--------------------------------------|----------|
| CONTENIDO RESIDUAL DE HUMEDAD DEL SUELO | <input type="text" value="0.038"/> | Tanto x1 |
| CAMBIO EN EL CONTENIDO DE HUMEDAD CUANDO PASA EL FRENTE MOJADO | <input type="text" value="0.16692"/> | Tanto x1 |
| <input checked="" type="checkbox"/> F(t)=K _i CALCULADO | | |
| F(t) VALOR INICIAL (OPCIONAL, PUEDE SER CALCULADO AUTOMATICAMENTE) | <input type="text" value="1.09"/> | cm |

INFILTRACIÓN ACUMULADA

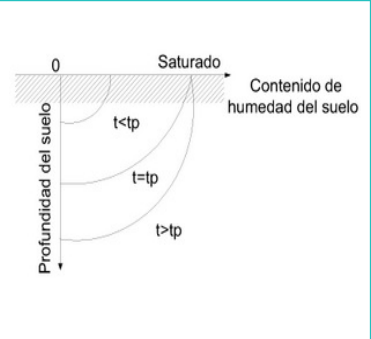
[CALCULAR F](#)

| | | |
|--------------------------|--------------------------------------|-------|
| INFILTRACIÓN ACUMULADA F | <input type="text" value="2.58719"/> | cm |
| TASA DE INFILTRACIÓN | <input type="text" value="1.71518"/> | cm/hr |

TIEMPO DE ENCHARCAMIENTO

[CALCULAR TIEMPO DE ENCHARCAMIENTO](#)

| | | |
|---|--------------------------------------|-------|
| INTENSIDAD DE LLUVIA (DEBE SER INGRESADO) | <input type="text" value="3.47"/> | cm/hr |
| TIEMPO DE ENCHARCAMIENTO | <input type="text" value="0.19585"/> | Horas |
| PROFUNDIDAD DE AGUA INFILTRADA | <input type="text" value="0.6796"/> | cm |



Perfiles de humedad del suelo antes, durante y después del encharcamiento.

Copyright © 2012-2012 Hydrovlab UTPL. All Rights Reserved.

Figura 51 Uso del programa modelo de infiltración Green-Ampt con datos de profundidad a 0 cm.

Fuente: Extraída de (Rivadeneira Erazo, 2013).

Una vez se ingresaron los valores correspondientes de la porosidad, la porosidad efectiva, la cabeza de succión en el frente mojado, la conductividad hidráulica, el tiempo, la saturación efectiva y la intensidad de lluvia; se procedió a calcular de manera automática el volumen sobrante del terreno, la variabilidad en la cantidad de humedad cuanto pasa por la cra mojada, la infiltración acumulada, la tasa de infiltración, el tiempo de encharcamiento y la profundidad de agua infiltrada.

B) Profundidad de 30 cm

INFILTRACIÓN MODELO GREEN AMPT


DESCARGAR MANUAL

VIDEO TUTORIAL

DATOS

MOSTRAR TABLA

| | | |
|---------------------------------------|-------|----------|
| POROSIDAD EFECTIVA | 0.330 | Tanto x1 |
| POROSIDAD | 0.393 | Tanto X1 |
| CABEZA DE SUCCIÓN EN EL FRENTE MOJADO | 26.10 | cm |
| CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (K) | 0.15 | cm/hr |
| TIEMPO | 1 | Horas |
| SATURACIÓN EFECTIVA S_e | 0.72 | Tanto x1 |



Este modelo requiere estimaciones de la Conductividad Hidráulica (K), de la Porosidad (n) y de la Cabeza de Succión del Suelo en el Frente Mojado, esto lo podemos hacer mediante la siguiente tabla

CALCULAR

EJEMPLO

LIMPIAR

RESULTADOS

| | | |
|--|--------|----------|
| CONTENIDO RESIDUAL DE HUMEDAD DEL SUELO | 0.063 | Tanto x1 |
| CAMBIO EN EL CONTENIDO DE HUMEDAD CUANDO PASA EL FRENTE MOJADO | 0.0924 | Tanto x1 |
| <input checked="" type="checkbox"/> $F(t)=kt$ CALCULADO | | |
| F(i) VALOR INICIAL (OPCIONAL, PUEDE SER CALCULADO AUTOMATICAMENTE) | 0.15 | cm |

INFILTRACIÓN ACUMULADA

CALCULAR F

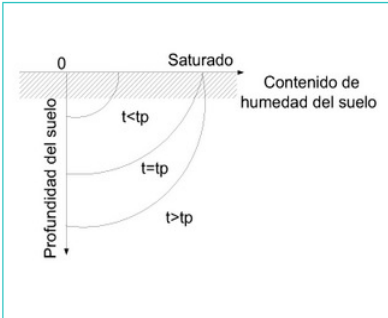
| | | |
|--------------------------|---------|-------|
| INFILTRACIÓN ACUMULADA F | 0.95087 | cm |
| TASA DE INFILTRACION | 0.53044 | cm/hr |

TIEMPO DE ENCHARCAMIENTO

INTENSIDAD DE LLUVIA (DEBE SER INGRESADO)

CALCULAR TIEMPO DE ENCHARCAMIENTO

| | | |
|--------------------------------|---------|-------|
| TIEMPO DE ENCHARCAMIENTO | 0.0314 | Horas |
| PROFUNDIDAD DE AGUA INFILTRADA | 0.10896 | cm |



Perfiles de humedad del suelo antes, durante y después del encharcamiento.

Copyright © 2012-2012 Hydroliab UTPL. All Rights Reserved.

Figura 52 Uso del programa modelo de infiltración Green-Ampt con datos de profundidad a 30 cm.

Fuente: Extraída de (Rivadeneira Erazo, 2013).

Lo mismo ocurrió con los otros incisos, teniendo en cuenta que los valores de entrada como los valores que se calculan varían de acuerdo con la relación entre ellos mismos, esto puede presentarse de manera proporcional o inversamente proporcional.

C) Profundidad de 60 cm


INFILTRACIÓN MODELO GREEN AMPT

DESCARGAR MANUAL

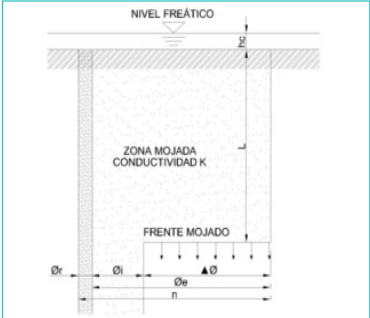
VIDEO TUTORIAL

DATOS

MOSTRAR TABLA



| | | |
|---------------------------------------|------------------------------------|----------|
| POROSIDAD EFECTIVA | <input type="text" value="0.335"/> | Tanto x1 |
| POROSIDAD | <input type="text" value="0.435"/> | Tanto X1 |
| CABEZA DE SUCCIÓN EN EL FRENTE MOJADO | <input type="text" value="36.74"/> | cm |
| CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (K) | <input type="text" value="0.06"/> | cm/hr |
| TIEMPO | <input type="text" value="1"/> | Horas |
| SATURACIÓN EFECTIVA S_e | <input type="text" value="0.6"/> | Tanto x1 |



Este modelo requiere estimaciones de la Conductividad Hidráulica (K), de la Porosidad (n) y de la Cabeza de Succión del Suelo en el Frente Mojado, esto lo podemos hacer mediante la siguiente tabla

CALCULAR
EJEMPLO
LIMPIAR

RESULTADOS

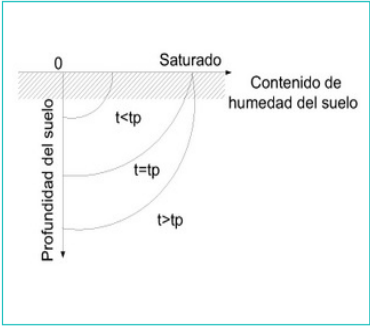
| | | |
|--|------------------------------------|----------|
| CONTENIDO RESIDUAL DE HUMEDAD DEL SUELO | <input type="text" value="0.1"/> | Tanto x1 |
| CAMBIO EN EL CONTENIDO DE HUMEDAD CUANDO PASA EL FRENTE MOJADO | <input type="text" value="0.134"/> | Tanto x1 |
| <input checked="" type="checkbox"/> F(t)=K _i CALCULADO | | |
| F(t) VALOR INICIAL (OPCIONAL. PUEDE SER CALCULADO AUTOMATICAMENTE) | <input type="text" value="0.06"/> | cm |

INFILTRACIÓN ACUMULADA

| | | |
|--------------------------|--------------------------------------|-------|
| INFILTRACIÓN ACUMULADA F | <input type="text" value="0.80229"/> | cm |
| TASA DE INFILTRACION | <input type="text" value="0.42818"/> | cm/hr |

TIEMPO DE ENCHARCAMIENTO

| | | |
|---|--------------------------------------|-------|
| INTENSIDAD DE LLUVIA (DEBE SER INGRESADO) | <input type="text" value="3.47"/> | cm/hr |
| TIEMPO DE ENCHARCAMIENTO | <input type="text" value="0.02496"/> | Horas |
| PROFUNDIDAD DE AGUA INFILTRADA | <input type="text" value="0.08661"/> | cm |



Perfiles de humedad del suelo antes, durante y despues del encharcamiento.

Copyright © 2012-2012 Hydroviab UTPL. All Rights Reserved.

Figura 53 Uso del programa modelo de infiltración Green-Ampt con datos de profundidad a 60 cm.

Fuente: Extraída de (Rivadeneira Erazo, 2013).

Existen términos que pueden ser muy variables de acuerdo con el estudio que se quiera realizar y a los cambios climáticos por temporadas, como el caso del tiempo y la intensidad de lluvia.

D) Profundidad de 100 cm

INFILTRACIÓN MODELO GREEN AMPT

[DESCARGAR MANUAL](#)

[VIDEO TUTORIAL](#)

DATOS

[MOSTRAR TABLA](#)

| | | | |
|---------------------------------------|------------------------------------|----------|--|
| POROSIDAD EFECTIVA | <input type="text" value="0.335"/> | Tanto x1 | |
| POROSIDAD | <input type="text" value="0.435"/> | Tanto X1 | |
| CABEZA DE SUCCIÓN EN EL FRENTE MOJADO | <input type="text" value="36.74"/> | cm | |
| CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (K) | <input type="text" value="0.06"/> | cm/hr | |
| TIEMPO | <input type="text" value="1"/> | Horas | |
| SATURACIÓN EFECTIVA S_e | <input type="text" value="0.6"/> | Tanto x1 | |

Este modelo requiere estimaciones de la Conductividad Hidráulica (K), de la Porosidad (n) y de la Cabeza de Succión del Suelo en el Frente Mojado, esto lo podemos hacer mediante la siguiente tabla

RESULTADOS

| | | | |
|--|------------------------------------|----------|--|
| CONTENIDO RESIDUAL DE HUMEDAD DEL SUELO | <input type="text" value="0.1"/> | Tanto x1 | |
| CAMBIO EN EL CONTENIDO DE HUMEDAD CUANDO PASA EL FRENTE MOJADO | <input type="text" value="0.134"/> | Tanto x1 | |
| <input checked="" type="checkbox"/> $F(t)=h$ CALCULADO | | | |
| F(t) VALOR INICIAL (OPCIONAL, PUEDE SER CALCULADO AUTOMATICAMENTE) | <input type="text" value="0.06"/> | cm | |

INFILTRACIÓN ACUMULADA

| | | | |
|--------------------------|--------------------------------------|-------|--|
| INFILTRACIÓN ACUMULADA F | <input type="text" value="0.80229"/> | cm | |
| TASA DE INFILTRACION | <input type="text" value="0.42818"/> | cm/hr | |

TIEMPO DE ENCHARCAMIENTO

INTENSIDAD DE LLUVIA (DEBE SER INGRESADO) cm/hr

| | | | |
|--------------------------------|--------------------------------------|-------|--|
| TIEMPO DE ENCHARCAMIENTO | <input type="text" value="0.02496"/> | Horas | |
| PROFUNDIDAD DE AGUA INFILTRADA | <input type="text" value="0.08661"/> | cm | |

Perfiles de humedad del suelo antes, durante y despues del encharcamiento.

Copyright © 2012-2012 Hydrovlab UTPL. All Rights Reserved.

Figura 54 Uso del programa modelo de infiltración Green-Ampt con datos de profundidad a 100 cm.

Fuente: Extraída de (Rivadeneira Erazo, 2013).

Como se puede observar entre la figura 53 y la figura 54 los datos son exactamente los mismos, este caso se presenta de manera particular ya que la textura del suelo a la profundidad de 60 cm y 100 cm es la misma, por lo que es normal que se den la misma información de entrada y resultados.

E) Profundidad de 200 cm


INFILTRACIÓN MODELO GREEN AMPT

DESCARGAR MANUAL


VIDEO TUTORIAL

DATOS

MOSTRAR TABLA



| | | |
|---------------------------------------|------------------------------------|----------|
| POROSIDAD EFECTIVA | <input type="text" value="0.412"/> | Tanto x1 |
| POROSIDAD | <input type="text" value="0.447"/> | Tanto X1 |
| CABEZA DE SUCCIÓN EN EL FRENTE MOJADO | <input type="text" value="4.21"/> | cm |
| CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (K) | <input type="text" value="2.99"/> | cm/hr |
| TIEMPO | <input type="text" value="1"/> | Horas |
| SATURACIÓN EFECTIVA S_e | <input type="text" value="0.64"/> | Tanto x1 |



Este modelo requiere estimaciones de la Conductividad Hidráulica (K), de la Porosidad (n) y de la Cabeza de Succión del Suelo en el Frente Mojado, esto lo podemos hacer mediante la siguiente tabla

CALCULAR

EJEMPLO

LIMPIAR

RESULTADOS

| | | |
|--|--------------------------------------|----------|
| CONTENIDO RESIDUAL DE HUMEDAD DEL SUELO | <input type="text" value="0.035"/> | Tanto x1 |
| CAMBIO EN EL CONTENIDO DE HUMEDAD CUANDO PASA EL FRENTE MOJADO | <input type="text" value="0.14832"/> | Tanto x1 |
| <input checked="" type="checkbox"/> $F(t)=kt$ CALCULADO | | |
| F(t) VALOR INICIAL (OPCIONAL, PUEDE SER CALCULADO AUTOMATICAMENTE) | <input type="text" value="2.99"/> | cm |

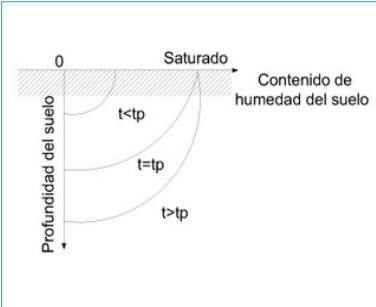
INFILTRACIÓN ACUMULADA

| | | |
|--------------------------|--------------------------------------|-------|
| INFILTRACIÓN ACUMULADA F | <input type="text" value="4.27614"/> | cm |
| TASA DE INFILTRACION | <input type="text" value="3.42662"/> | cm/hr |

TIEMPO DE ENCHARCAMIENTO

| | | |
|---|-----------------------------------|-------|
| INTENSIDAD DE LLUVIA (DEBE SER INGRESADO) | <input type="text" value="3.47"/> | cm/hr |
|---|-----------------------------------|-------|

| | | |
|--------------------------------|--------------------------------------|-------|
| TIEMPO DE ENCHARCAMIENTO | <input type="text" value="1.12094"/> | Horas |
| PROFUNDIDAD DE AGUA INFILTRADA | <input type="text" value="3.88966"/> | cm |



Perfiles de humedad del suelo antes, durante y despues del encharcamiento.

Copyright © 2012-2012 Hydrovlab UTPL. All Rights Reserved.

Figura 55 Uso del programa modelo de infiltración Green-Ampt con datos de profundidad a 200 cm.

Fuente: Extraída de (Rivadeneira Erazo, 2013).

Tabla 4 Resultados generados por el programa de los parámetros de infiltración.

| Textura | Profundidad (cm) | Infiltración acumulada (cm) | Infiltración acumulada (mm) | Tasa de Infiltración (cm/h) | Tasa de infiltración (mm/h) |
|------------------------|------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Limo-arenoso | 0 | 2.59 | 25.9 | 1.72 | 17.2 |
| Limo-arcilloso-arenoso | 30 | 0.95 | 9.5 | 0.53 | 5.3 |
| Arcillo-arenoso | 60 | 0.80 | 8 | 0.43 | 4.3 |

| | | | | | |
|-----------------|-----|------|------|------|------|
| Arcillo-arenoso | 100 | 0.80 | 8 | 0.43 | 4.3 |
| Arena-arcillosa | 200 | 4.28 | 42.8 | 3.43 | 34.3 |

Fuente: Elaboración Propia (2020).

Como se comprobó, los datos calculados de manera teórica manual tuvieron un margen de error 0,385% teniendo en cuenta la exactitud del programa al generar cálculos automáticos.

Por otro lado, basados en la tesis de los autores (Quiroga Belalcázar & Vega Cárdenas, 2019), se hallaron concordancias con esta tesis, tales como:

- El documento del 2019 relata que se encontró una textura general de Arena-arcillosa; En el trabajo actual, al realizar un análisis más específico se encontró en tres profundidades del estudio un suelo relacionado con estas combinaciones (profundidades de 60, 100 y 200 cm).
- En este proyecto, se logró deducir a partir de los cálculos que a pesar de que el efecto de la infiltración es un poco tedioso en profundidades superficiales, luego de los 200 cm se da una tasa de infiltración y una infiltración acumulada considerable. Y de igual manera, en el trabajo de grado de los autores (Quiroga Belalcázar & Vega Cárdenas, 2019) se evidencian y presentan en los resultados que hay una alta capacidad de infiltración.

Finalmente, se recopila a continuación en la tabla 5 los datos correspondientes a los parámetros de infiltración hallados, de acuerdo a las distintas profundidades del terreno:

Tabla 5 Parámetros de infiltración obtenidos.

| Profundidad (cm) | Infiltración acumulada (cm) | Tasa de infiltración (cm/h) | Tiempo de encharcamiento (horas) | Profundidad de agua infiltrada (cm) |
|-------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---|--|
| 0 | 2.60 | 1.72 | 0.20 | 0.68 |
| 30 | 0.95 | 0.56 | 0.03 | 0.11 |
| 60 | 0.80 | 0.43 | 0.02 | 0.09 |
| 100 | 0.80 | 0.43 | 0.02 | 0.09 |
| 200 | 4.28 | 3.43 | 1.12 | 3.89 |

Fuente: Elaboración Propia (2020).

9. Conclusiones

Una vez terminado el trabajo de estudio se pudo concluir que:

1) La estimación de parámetros fue todo un éxito, ya que se logró encontrar las tasas de infiltración, la infiltración acumulada, el tiempo de encharcamiento y la profundidad de agua infiltrada a distintas profundidades; y de manera adicional, se mostraron dos alternativas para calcular estos valores.

2) El estado del conocimiento es una pieza fundamental para entender las distintas metodologías que se pueden implementar a la hora de necesitar los parámetros de infiltración de suelo; tanto así, que en este trabajo de grado se basó el estudio a partir de uno de los artículos expuestos.

3) Con las herramientas de Google Maps y SoilGrids 3D se logró delimitar de manera adecuada la sede de la Universidad Antonio Nariño sede Usme. Además, de permitir el análisis de texturas de suelo de aquella zona. Siendo este, parte esencial de base para el trabajo.

4) La información geográfica dada por el software SoilGrids (actualización de mayo 2020) no es utilizable para zonas de estudios debido a que no brindan datos de características como porosidad, porosidad efectiva, capilaridad y conductividad hidráulica. Sin embargo, si es posible recopilar información de texturas de suelo la cual sirve como datos iniciales para conseguir los parámetros de infiltración.

5) En relación con la conclusión anterior; este tipo de trabajos son importantes debido a que se tiene información hidrogeológica de estas pequeñas zonas, las cuales no se adquieren con facilidad.

6) Gracias a la extensa información que se halla por vía internet, se lograron identificar complementos primordiales y secundarios en el desarrollo del documento como lo es la

herramienta de infiltración Green Ampt y el sistema de información geográfica Qgis, datos convenientes sobre características de la zona, términos que agregan una mayor contextualización en el tema, entre otros.

7) El progreso de estos temas motiva a los estudiantes de la universidad Antonio Nariño a crear propuestas de investigación que tomen como apoyo a esta monografía y así mismo, generar indagaciones que abarque esta sede a nivel global.

8) La creación de un mapa de texturas del suelo permite comprender como está clasificado el terreno hasta cierta profundidad y como se puede efectuar la infiltración de acuerdo con estos.

9) Dependiendo de las variables del territorio, de los cambios climáticos que se den allí y del gusto del autor, se pueden escoger y realizar otro tipo de métodos para encontrar estos parámetros.

10) A mayor saturación efectiva, menor será la infiltración acumulada y la tasa de filtración de agua; esto se da, porque la capacidad de embebimiento del suelo es exponencial decreciente con respecto a este dato. Entre más se sature el suelo, los valores de estos parámetros se acercarán a ser constante y el mismo que el de la conductividad eléctrica.

11) El trabajo se encuentra sujeto a estimaciones aproximadas y en condiciones comunes que se dan en la localidad de Usme; en caso de haber algún fenómeno que altere la naturalidad del suelo, es necesario volver a realizar estudios.

10. Recomendaciones

1) En caso de tener acceso a las dos alternativas para obtener los parámetros de infiltración con el modelo Green-Ampt se sugiere usar el programa ya que cuenta con mayor exactitud, es más sencilla la obtención de los datos y ahorra un considerable tiempo.

2) El programa de modelo de infiltración Green-Ampt cuenta con distintas explicaciones para entenderlo, desde manuales, un ejercicio de ejemplo, tablas de información básica de textura de suelo y hasta figuras con la descripción del fenómeno.

3) En caso de tener software de sistemas de información geográfico como ArcGIS, se puede hallar contenido relevante en entidades como el IGAC que cuentan con archivos Shapefile que solo pueden ser leídos por programas como el mencionado anteriormente.

4) Para la generación de resultados de total seguridad es necesario efectuar pruebas de campo que mitiguen o eliminen las estimaciones.

5) En el sentido de crítica y comparación, sería pertinente implementar otro tipo de metodología como Horton y crear un análisis de semejanzas y diferencias de los resultados.

11. Anexos

Se anexa en CD, el artículo correspondiente al trabajo de grado de caracterización de parámetros y análisis de la infiltración del suelo en la universidad Antonio Nariño sede Usme junto con su presentación.

12. Referencias

- Abbaspour, K., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H., & Klove, B. (2015). A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*, 733-752.
- Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (Febrero de 2018). CARACTERIZACIÓN GENERAL DE ESCENARIOS DE RIESGO. Obtenido de IDIGER: <https://www.idiger.gov.co/documents/20182/301123/GAR-PD-06+Caracterizaci%C3%B3n+de+los+Escenarios+de+Riesgo+V1.pdf/05f754b3-7b3e-4c48-9887-df965efb32fa>
- Annan, P. A. (2005). GPR Methods for Hydrogeological Studies. *Hydrogeophysics*, 185-213.
- Caballero, M. (s.f.). Contenido de humedad. Obtenido de SCRIBD: <https://es.scribd.com/doc/141685109/Definicion-de-contenido-de-humedad>
- Cheng, D. B., Dong, L. Y., Qian, F., & Sun, B. (2017). Observation and modeling on irregular purple soil water infiltration process. *Journal of Mountain Science*, 1076-1085.
- Coluccio, K., & Morgan, L. K. (2019). A review of methods for measuring groundwater–surface water exchange in braided rivers Katie Coluccio¹ and Leanne Kaye Morgan. *Hydrology and Earth System Sciences*, 4397–4417.

- Essouayed, E., Annable, M. D., Momtbrun, M., & Atteia, O. (2019). An innovative tool for groundwater velocity measurement compared with other tools in laboratory and field tests. *Journal of Hydrology X*.
- FAO. (s.f.). Propiedades Físicas del Suelo. Obtenido de Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/>
- Fuentes Russi, C. (2018). APLICACIÓN DE HERRAMIENTAS SIG PARA LA DETERMINACIÓN DE LA TASA DE INFILTRACIÓN EN EL MUNICIPIO DE PATÍA, CAUCA. Bogotá D.C., Colombia: Tesis de monografía Universidad Antonio Nariño.
- Gao, S., Jin, H., Bense, V. F., Wang, X., & Chai, X. (2019). Application of electrical resistivity tomography for delineating permafrost hydrogeology in the headwater area of Yellow River on Qinghai-Tibet Plateau, SW China. *Hydrogeology Journal*, 1725–1737.
- González, M. (10 de Enero de 2012). Mecánica de Suelos – Capilaridad. Obtenido de La Guía: <https://fisica.laguia2000.com/dinamica-clasica/fuerzas/mecanica-de-suelos-capilaridad>
- Hammecker, C., Barbiéro, L., Boivin, P., Maeght, J. L., & B. Diaw, E. H. (2004). A Geometrical Pore Model for Estimating the Microscopical Pore Geometry of Soil with Infiltration Measurements. *Transport in Porous Media*, 193-219.
- Hu, H., Yang, Z., & Tian, F. (2009). Spatial averaging infiltration model for layered soil. *Science China Technological Sciences*, 1050-1058.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (17 de Agosto de 2018). ¿Qué hacemos? Obtenido de IGAC Instituto Geográfico Agustín Codazzi: <https://www.igac.gov.co/es/que-hacemos>
- ISRIC. (2017). SoilGrids - información global del suelo en cuadrícula. Obtenido de ISRIC World Soil Information: <https://www.isric.org/explore/soilgrids>

- Jamin, P., & Brouyère, S. (2018). Monitoring transient groundwater fluxes using the Finite Volume Point Dilution Method. *Journal of Contaminant Hydrology*, 10-18.
- Jiao, J., Zhang, Y., & Zhu, J. (2017). Direct Hydraulic Parameter and Function Estimation for Diverse Soil Types Under Infiltration and Evaporation. *Transport in Porous Media*, 797-823.
- Larionov, G., Dobrovolskaya, N., Kiryukhina, Z., Krasnov, S., Litvin, L., Gorobets, A., & Sudnitsyn, I. (2017). Effect of soil density, tensile strength, and water infiltration on the rupture rate of interaggregate bonds. *Eurasian Soil Science*, 335-340.
- Latorre, B., & Fernández Moret, B. (2019). Simultaneous estimation of the soil hydraulic conductivity and the van Genuchten water retention parameters from an upward infiltration experiment. *Journal of Hydrology*, 461-469.
- Lei, G., Fan, G., Zeng, W., & Huang, J. (2020). Estimating parameters for the Kostiakov-Lewis infiltration model from soil physical properties. *Journal of Soils and Sediments*, 166-180.
- Martínez Alfaro, P. E., Martínez Santos, P., & Castaño Castaño, S. (2005). *Fundamentos de la hidrogeología*. España: Mundi-premsa.
- Muntohar, A., & Liao, H. (2019). Factors affecting rain infiltration on a slope using Green-Ampt model. *Journal of Physical Science*, 71-86.
- Nanopdf. (15 de Enero de 2018). *Hidrología superficial: Infiltración*. Obtenido de NANOPDF.COM: https://nanopdf.com/download/hidrologia-superficial-infiltracion_pdf
- Oilfield Glossary. (s.f.). porosidad efectiva. Obtenido de Oilfield Glossary: https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/e/effective_porosity.aspx
- Omuto, T., Minasny, B., McBratney, A., & Biamah, E. (2006). Nonlinear mixed effect modelling for improved estimation of water retention and infiltration parameters. *Journal of Hydrology*, 748-758.

- OSGeoLive. (s.f.). QGIS. Obtenido de OSGeo Project:
https://live.osgeo.org/es/overview/qgis_overview.html
- Pedersen, J., Lund V., N., Borup, M., Löwe, R., Poulsen, T., Mikkelsen, P., & Grum, M. (2016). Evaluation of Maximum a Posteriori Estimation as Data Assimilation Method for Forecasting Infiltration-Inflow Affected Urban Runoff with Radar Rainfall Input. *Water* (Switzerland), 381.
- Pérez, G. (s.f.). Infiltración del agua. Obtenido de Ciclo Hidrologico .com:
https://www.ciclohidrologico.com/infiltracin_del_agua
- Putte, A., Govers, G., Leys, A., Langhans, C., Clymans, W., & Diels, J. (2013). Estimating the parameters of the Green–Ampt infiltration equation from rainfall simulation data: Why simpler is better. *Journal of Hydrology*, 332-344.
- Quiroga Belalcázar , J., & Vega Cárdenas, A. (Junio de 2019). Caracterización hidrogeológica del riachuelo de la quebrada Fucha. Tesis de pregrado. Bogotá D.C., Colombia: Universidad Antonio Nariño.
- Raffino, M. E. (11 de Octubre de 2019). Concepto.de. Obtenido de Conductividad Eléctrica:
<https://concepto.de/conductividad-electrica/>
- Raffino., M. E. (12 de Febrero de 2020). Concepto.de. Obtenido de Erosión del suelo:
<https://concepto.de/erosion-del-suelo/>
- Rahardjo, H., Ong, T., Rezaur, R., Leong, E., & Fredlund, D. (2010). Response parameters for characterization of infiltration. *Environmental Earth Sciences*, 1369-1380.
- Ravindra, K. K., & Bhabagrahi, S. (2011). Green-Ampt Infiltration Models for Varied Field Conditions: A Revisit. *Water Resources Management*, Art. 3505.
- Rawls, W., ASCE, M., Brakensiek, L., & Miller, N. (1983). GREEN-AMPT INFILTRATION PARAMETERS FROM SOILS DATA. *Journal of Hydraulic Engineering*.

Ren, X., Hong, N., Li, L., Kang, J., & Li, J. (2020). Effect of infiltration rate changes in urban soils on stormwater runoff process. *Geoderma*, V. 363.

Rivadeneira Erazo, B. G. (9 de Junio de 2013). Infiltración Modelo Green Ampt. Obtenido de Laboratorio virtual de hidrogeología: http://200.0.29.31/infiltracion/Infiltracion_Green-Ampt.aspx

Rodriguez, B. (16 de Noviembre de 2013). Infiltracion en el. Obtenido de SlideShare: <https://es.slideshare.net/rodriguez1990/instituto-universitario-politcnico-28324969>

Rodriguez, D., & Bernal, Á. (s.f.). HIDROLOGIA, infiltracion INGENIERIA CIVIL. Obtenido de ACADEMIA.edu:

https://www.academia.edu/35770469/HIDROLOGIA_infiltracion_INGENIERIA_CIVIL

Ruiz Romera, E., & Martínez Santos, M. (s.f.). TEMA 4. INFILTRACIÓN Y HUMEDAD DEL SUELO . Obtenido de HIDROLOGÍA APLICADA : https://ocw.ehu.eus/pluginfile.php/4575/mod_resource/content/1/Material_Docente/Tema_4.pdf

Sánchez Cohen, I., & Asseline, J. (1997). TIPOS DE SIMULADORES DE LLUVIA. Obtenido de Uso de lluvia artificial para parametrizar modelos de procesos hidrológicos: https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_7/b_fdi_53-54/010020394.pdf

Sepor. (4 de Septiembre de 2017). Infiltración del agua en el suelo. Importancia y métodos para medirla. Obtenido de PortalFruticola.com: <https://www.portalfruticola.com/noticias/2017/09/04/infiltracion-del-agua-en-el-suelo-importancia-y-metodos-para-medirla/>

Sepor. (4 de Septiembre de 2017). Infiltración del agua en el suelo. Importancia y métodos para medirla. Obtenido de Portalfruticola.com:

<https://www.portalfruticola.com/noticias/2017/09/04/infiltracion-del-agua-en-el-suelo-importancia-y-metodos-para-medirla/>

Servicio Geológico Colombiano. (28 de Septiembre de 2015). ¿Quiénes somos? Obtenido de SGC

Servicio Geológico Colombiano:

<https://www2.sgc.gov.co/Nosotros/AcercaDelSgc/Paginas/Quienes-Somos.aspx#>

Singh Kumar, V., Kumar, D., Kashyap, P., Singh Kumar, P., Kumar, A., & Singh Kumar, S.

(2020). Modelling of soil permeability using different data driven algorithms based on physical properties of soil. *Journal of Hydrology*, 124-223.

Singh, B., Sihag, P., & Deswal, S. (2019). Modelling of the impact of water quality on the infiltration rate of the soil. *Applied Water Science*.

Sociedad Geográfica de Lima. (2011). Global Water Partnership. Obtenido de Aguas

Subterráneas—Acuíferos: https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/aguas_subterranas.pdf

SoilGrids 3D. (2020). SoilGrids 3D. Obtenido de SoilGrids 3D: [https://soilgrids.org/#!/lon=-](https://soilgrids.org/#!/lon=-74.0929931&lat=4.475974&zoom=14&layer=CLYPPT_M_sl7_250m&vector=1&showInfo=1)

[74.0929931&lat=4.475974&zoom=14&layer=CLYPPT_M_sl7_250m&vector=1&showInfo=1](https://soilgrids.org/#!/lon=-74.0929931&lat=4.475974&zoom=14&layer=CLYPPT_M_sl7_250m&vector=1&showInfo=1)

Universidad de Piura. (s.f.). CAPÍTULO 3: INFILTRACIÓN . Obtenido de Tesis de investigación:

http://www.biblioteca.udep.edu.pe/BibVirUDEP/tesis/pdf/1_136_147_89_1258.pdf

Universidad Nacional del Nordeste. (s.f.). III.3. Infiltración 4.Balance Hídrico.doc. Obtenido de

III.3. INFILTRACION: <http://ing.unne.edu.ar/pub/infi.pdf>

Warsi, T., Kumar, V., Dhakate, R., Manikyamba, C., Rao, T., & Rangarajan, R. (2019). An

integrated study of electrical resistivity tomography and infiltration method in deciphering the characteristics and potentiality of unsaturated zone in crystalline rock. *HydroResearch*, 109-118.

Yin, Q., Jing , H., Ma, G., Su, H., & Liu, R. (2019). Laboratory investigation of hydraulic properties of deformable rock samples subjected to different loading paths. *Hydrogeology Journal*, 2617–2635.

Zakwan, M., Muzzammil, M., & Alam, J. (2016). Application of spreadsheet to estimate infiltration parameters. *Perspectives in Science*, 702-704.