

Capítulo 10 / Chapter 10

Construcción de insumos sobre recarga acuífera para una estrategia de gestión de ciclo hídrico en el Área Metropolitana de San Salvador, El Salvador, Centroamérica

Construction of inputs on aquifer recharge for a water cycle management strategy in the Metropolitan Area of San Salvador, El Salvador, Central America

César Alvarado¹, DAAD Alumnus

Ingrid Alfaro²,

José Alexander Chávez²,

Marcia Barrera¹,

Efraín Alas²,

Sara Cornejo²,

Mauricio Vásquez²,

Fernando Menjívar¹,

David Flores¹



¹Universidad de El Salvador (UES)

²Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (OPAMSS)

Resumen

En búsqueda de mejorar el balance hídrico, mejorar criterios y zonificar las áreas de mayor interés por infiltración se ha realizado un levantamiento de permeabilidad, estratigrafía y granulometría dentro del Área Metropolitana de San Salvador. Esta zona es eminentemente volcánica con estratigrafía donde se intercalan capas de diferente permeabilidad, siendo por esto importante conocer su distribución y propiedades con respecto al agua subterránea. Se ha obtenido una base de datos de capas geológicas con permeabilidad, granulometría, así como modelos

Abstract

In search of improving the water balance, improving criteria, and zoning the areas of greatest interest due to infiltration, a survey of permeability, stratigraphy, and granulometry has been carried out within the Metropolitan Area of San Salvador. This area is eminently volcanic with stratigraphy where layers of different permeability are interspersed, making it important to know its distribution and properties with respect to groundwater. A database of geological layers with permeability, granulometry, as well as superficial and deep

estratigráficos superficiales y profundos, que ayudarán en la toma de decisiones de zonas y capas que pueden ser valoradas para recarga artificial en búsqueda de la sostenibilidad del Área Metropolitana.

Palabras claves: Permeabilidad, infiltración, granulometría, estratigrafía, geología, recarga, ciclo hidrológico

stratigraphic models has been obtained, which will help in making decisions about zones and layers that can be valued for artificial recharge in search of the sustainability of the Metropolitan Area.

Keywords: Permeability, infiltration, granulometry, stratigraphy, geology, recharge, hydrological cycle

Introducción

El crecimiento del Área Metropolitana de San Salvador (AMSS) se ha extendido a lo largo del valle de Las Hamacas, reduciendo las zonas de recarga acuífera, ocupando suelos problemáticos, perturbando el ciclo hidrológico y, por ende, afectando la disponibilidad de agua futura en los acuíferos de la zona. Por primera vez de manera sistemática se ha levantado información de permeabilidad y texturas de suelo dentro de la zona, lo cual servirá como insumo importante en el balance hídrico, así como en la toma de decisiones para medidas de mitigación/adaptación. Los resultados exponen que la cobertura superficial de Tierra Blanca Joven (TBJ) (última erupción pliniana de la caldera de Ilopango) posee una permeabilidad moderada a muy lenta (suelo colapsable y susceptible a licuefacción), estando la estratigrafía de la zona compuesta por capas con variable valor de permeabilidad y paleosuelos intercalados.

La construcción y obtención de una base de datos ayudará a tener criterios para realizar obras de infiltración, evitar la erosión subterránea y para prepararse en cuanto a los escenarios de cambio climático donde se prevé disminución de lluvias, así como aumento en la temperatura.

La planificación dentro del AMSS debe considerar los cambios generados por el crecimiento poblacional, la impermeabilización de los suelos, la demanda de agua y el cambio climático, para hacer efectivo un crecimiento sostenible de la ciudad. Por esa razón, esta investigación hace énfasis en la cooperación institucional entre la Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (OPAMSS), las municipalidades y la Universidad de El Salvador (UES). Esta cooperación institucional tiene como objetivo principal el desarrollo de información técnica valiosa que permita la caracterización de los suelos, las tasas de infiltración del AMSS y algunas propuestas de modelos de gestión de la recarga acuífera, tales como el de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), partiendo de la ecuación del balance hídrico general que pretende encontrar la proporción y distribución del agua que reciben los acuíferos por infiltración directa de lluvia, por medio del análisis de capacidad de infiltración del suelo, sin dejar de lado los demás parámetros del ciclo hidrológico, y la salida ya sea de forma natural o artificial.

El objetivo de este esfuerzo es desarrollar insumos sobre recarga acuífera, por medio de análisis físicos de suelos y de la variabilidad de infiltración para la propuesta de estrategias de gestión del ciclo hidrológico en el AMSS. La cooperación institucional de este proyecto pretende varios alcances, entre ellos, la capacitación en el manejo de información técnica referente a las características físicas de los suelos, sobre

los diferentes métodos de cálculo de infiltración de suelos, evaluación de la estratigrafía y fundamentación teórica de hidrogeología en general.

Antecedentes

El AMSS está compuesto por 14 municipios y se localiza en la zona central del país, extendiéndose en una superficie que cubre 589.91 km², aproximadamente equivalentes al 3% del territorio nacional. De esta superficie, el área urbana corresponde a 175.28 km² (Miranda y Santos, 2014).

Las condiciones topográficas prevalecientes en la zona de influencia del AMSS corresponden a una superficie ondulada, que comprende áreas de grandes elevaciones o pendientes (volcán de San Salvador) y áreas de valles o planicies (zona urbana del AMSS), lo cual se establece como condicionante para el sistema de drenaje natural existente, presentando ciertas quebradas de invierno, que pueden generar y transportar caudales de moderados a intensos, dependiendo de la intensidad de las precipitaciones de la zona (que tiene un caudal base de aguas negras).

La hidrología de las aguas superficiales del AMSS es la típica de aquellas regiones tropicales con una época seca y una época lluviosa, en la que precipita casi el 93% de la lluvia de todo el año. Por esto, el sistema fluvial está sujeto a periodos en los que la ausencia total de lluvias causa bajos volúmenes y, por consiguiente, la calidad de las aguas tiene una fuerte dependencia de la situación sanitaria del desarrollo humano.

En El Salvador se observa predominancia de materiales de origen volcánico en casi toda su extensión territorial, como resultado del vulcanismo intenso desde el principio del Terciario hasta la actualidad. Por lo tanto, se presentan numerosas formaciones de edificios volcánicos, desde la más antigua al norte del país y la más joven, que recorre el eje central; la mayoría de ellos con laderas inestables y poco consolidadas (Mata y Puiguriguer, 2000). Agregado a esto, las condiciones climáticas y litológicas originan la formación de cárcavas. Dichas estructuras son el producto de la erosión por la deforestación y pérdida de cohesión del suelo por disminución de succión (Chávez et al., 2016). Este problema se da especialmente en tefras no consolidadas de TBJ de la caldera de Ilopango que se encuentran en gran espesor en la zona de estudio. Según Conacher y Sala (1998) se define a una cárcava como un conjunto de zanjas o conjuntos de canales que se desarrollan sobre capas de materiales no consolidados de la superficie terrestre. En la terminología internacional se les conoce como “*badlands*”. Pueden medir desde aproximadamente 30 centímetros hasta varias decenas de metros de espesor. Al principio son surcos ramificados donde corre el agua, que evolucionan a torrentes, acá se incluye procesos de erosión subterráneas y piping.

Los autores Gómez-Gutiérrez, Schnabel y Lavado-Contador (2011) han diferenciado tradicionalmente entre cárcavas efímeras y permanentes. En el caso del AMSS se puede observar que la problemática va creciendo con el tiempo, pudiendo evolucionar a quebradas o barrancos. Sumado a esto, por desconocimiento de las propiedades de los suelos y su comportamiento, los encargados de las construcciones no siguen buenas prácticas, por lo que se sufre de problemas de colapso de las viviendas, calles y erosión intensa provocando daños ambientales, económicos y sociales de manera constante (Lucero-Morán, 2018).

Esta problemática va creciendo en frecuencia e intensidad cada año y está relacionada directamente con la intensidad de lluvias que se registran, contabilizándose pérdidas de vidas humanas y pérdidas económicas cuantiosas por los gastos en reparaciones o mitigaciones en las áreas más vulnerables (Chávez et al., 2012). Aunque esta situación se vive a nivel nacional, en el AMSS se percibe aún más debido a la urbanización y crecimiento de las ciudades, lo que genera un mayor caudal de escorrentía y menor posibilidad de infiltración.

Al ser el AMSS eminentemente un territorio volcánico tectónico, encontrándose rodeado de volcanes antiguos y activos (caldera de Ilopango y volcán San Salvador), cada estrato muestra características particulares por lo que es de interés conocer su distribución y propiedades relacionadas a la geotecnia y a las aguas subterráneas, así como su incidencia en el ciclo hidrológico.

Debido a esto, la OPAMSS ha iniciado un proyecto en el marco de programa EUROCLIMA+ "Inciendiando en Gestión de Ciclo Hidrológico con Enfoque en Aguas Subterráneas para Adaptación al Cambio Climático en Área Metropolitana de San Salvador", con apoyo de la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID), que ha permitido realizar una alianza estratégica con la Facultad de Ciencias Naturales y Matemática de la UES, con el objetivo de ejecutar actividades de procesamiento, análisis físico de suelo y cálculo de infiltración en el AMSS, para identificar zonas de mayor recarga y realizar estudios especializados de geofísica e hidrogeología que sirvan de insumos para proponer una metodología para la protección de zonas de importancia hidrogeológicas en el AMSS.

Geología y recarga acuífera del AMSS

Según Lexa et al. (2022) en el AMSS hay restos de volcanes basáltico-andesíticos que corresponden a los estratovolcanes de la Formación Bálsamo del Mioceno-Plioceno (Jayaque, Panchimalco y Antiguo Ilopango) y las recientes hasta las poco más jóvenes formaciones volcánicas ácidas de la Formación Cuscatlán relacionadas con la evolución de calderas, parcialmente en el interior del frente volcánico. La Formación Cuscatlán está representada sobre todo por ignimbritas extensas suprayacentes a la Formación Bálsamo, las cuales son probablemente producto de la caldera Jayaque que se encuentra al noroeste. Su espesor llega hasta los 120 m. Una posición parecida tienen también las ignimbritas en la parte suroriental del área y, probablemente, tienen relación con una caldera más antigua en el ámbito de la actual caldera de Ilopango. A la formación Cuscatlán pertenecen también, debido a su edad más joven y a su composición, los volcanes dacíticos extrusivos de San Jacinto, Loma Larga y el cono cinerítico dacítico San José, al norte de Planes de Renderos. Durante el Cuaternario se desarrolló el Graben Central y en él se encuentran ubicados estratovolcanes pleistocenos hasta estratovolcanes andesíticos recientes. La Formación de San Salvador se produce como cubierta de tefra a lo largo de la cresta de la cordillera Bálsamo, donde descansa sobre las lateritas de la Formación de Bálsamo y en el centro de Graben. Las unidades de tefra del volcán San Salvador, Apopa, G1 y G2, y las unidades de tefra de caldera de Ilopango, Tierra Blanca 4 a 2 y TBJ cubren el lapso de tiempo de 70 ± 1 Ka. Las unidades de tefra están separadas por horizontes de suelo fósil y acumulaciones de depósitos polvorientos eólicos de color marrón. Las lateritas y los horizontes de tefra suprayacentes interestratificados con el suelo fósil desempeñan un papel crucial en los peligros naturales y movimiento del agua subterránea.

Los autores Alfaro et al. (2019) muestran la zonificación histórica de recarga acuífera que se tiene del sector de interés. Esta información tiene que actualizarse con nuevos datos ‘levantados en campo’, lo que conforma esta investigación, ya que la componente de trabajo de campo ha sido fortalecida (Fig. 1).

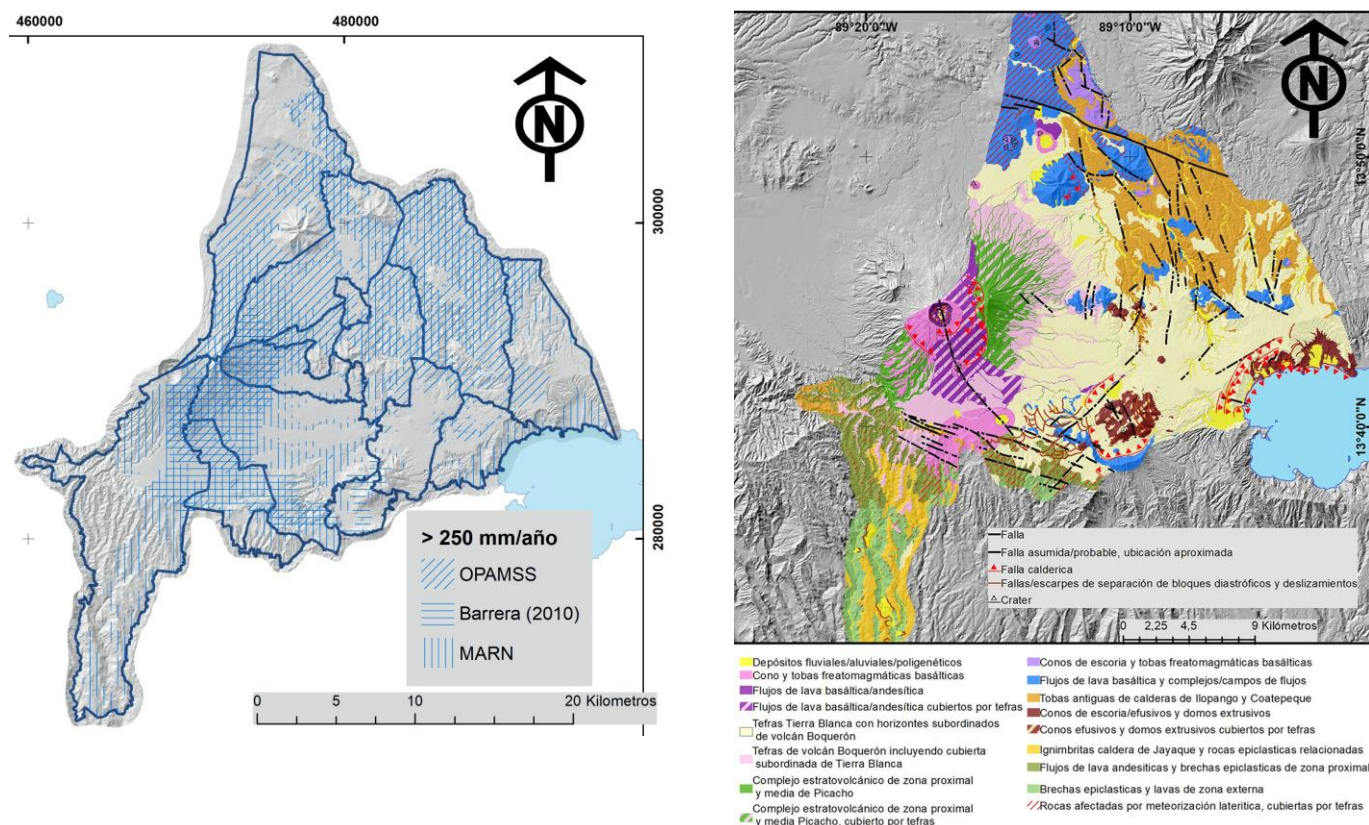


Figura 1. Mapa con recarga acuífera mayor a 250 mm/año (Izq.) según Alfaro et al. (2019) y geológico (Der.) según Lexa et al. (2022)

Marco conceptual

Pruebas de permeabilidad

El proceso de infiltración de agua en el suelo ha sido intensamente estudiado debido a su importancia en el manejo del agua en la agricultura, la conservación del recurso suelo, la recarga hacia los acuíferos y otras actividades técnicas (Alvarado-Batres y Barahona-Palomo, 2017). Además, el proceso de infiltración es de gran importancia práctica dado que su velocidad determina generalmente la cantidad de agua de escurrimiento, pudiendo detectarse así el peligro de erosión durante inundaciones o lluvias muy intensas.

Kostiakov (1932) propuso una ecuación empírica (Ecuación 1) que ha demostrado una gran aceptación para ser utilizadas en las prácticas de riego. A pesar de que las unidades y dimensiones de los parámetros C y α parecen no tener significado, sí es posible interpretarlos físicamente. El parámetro C representa la lámina de agua infiltrada durante el primer minuto y depende de la estructura y de las condiciones que tiene el suelo al inicio de la aplicación del agua.

El parámetro α es un indicativo de que cómo la tasa de infiltración decrece con el tiempo de aplicación del agua y por consiguiente, depende de los cambios que puedan ocurrir en la estructura del suelo como efecto del humedecimiento (Jiménez-Steer y Rodríguez, 2008). El modelo de Kostiakov está representado por la ecuación:

$$i = C t^{\alpha} \quad \text{Ecuación 1}$$

Los modelos analíticos que representan el flujo a través de un pozo o agujero de infiltración en régimen permanente desde un pozo de radio a y altura de agua constante “ H ”, en un medio poroso, rígido, semi-infinito, homogéneo e isotrópico, se deducen a partir de la ley de Darcy, ya sea en un suelo totalmente saturado o no, considerando que pueden intervenir distintos tipos de flujo (Fig. 2).

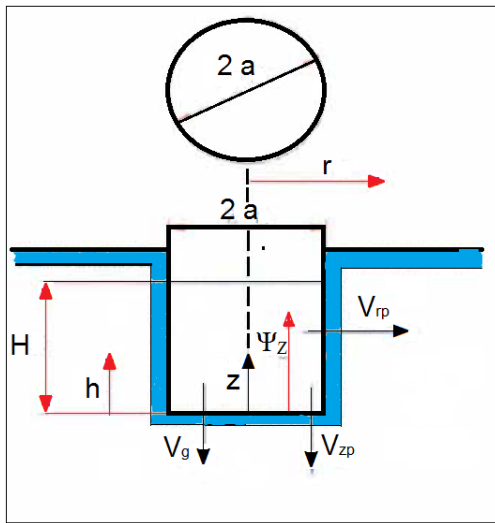


Figura 2. Modelo de infiltración del agua (Alvarado-Batres, 2015)

A partir de la Figura 2 se puede deducir lo siguiente, donde:

$$V_{rp} = -K(\psi) \cdot \frac{\partial \psi}{\partial r} \quad r = a \quad \text{Ecuación 2}$$

$$V_{zp} = -K(\psi) \cdot \frac{\partial \psi}{\partial z} \quad z = 0 \quad \text{Ecuación 3}$$

$$V_g = -K(\psi) \cdot \frac{\partial \psi_z}{\partial z} = -K_{fs} \quad \text{Ecuación 4}$$

V_{rp} representa el flujo a través de las paredes del pozo inducido por el gradiente radial de presión, V_{zp} representa el flujo a través de la base del pozo inducido por el gradiente vertical de presión y V_g representa el valor del flujo gravitacional, ψ es la altura de presión del agua en el suelo (L), ψ_z es la altura de agua relativa a la base del pozo (L) y K la conductividad hidráulica (LT^{-1}).

Luego el caudal infiltrado en el agujero se puede escribir como:

$$Q = \int_{A_p} V_{rp} dA_p + \int_{A_b} V_{zp} dA_b + \int_{A_b} V_g dA_b \quad \text{Ecuación 5}$$

donde dA_p y dA_b representan el diferencial de área de las paredes y la base del pozo respectivamente.

Si se considera como caso particular que el terreno que rodea el pozo está totalmente saturado se debe reemplazar para el análisis de la ecuación anterior $K(\psi)$ por K_{fs} (conductividad hidráulica saturada de campo).

Desarrollando de manera teórica, numérica y empírica la ecuación anterior, se puede obtener la siguiente expresión para el caudal de infiltración:

$$Q = \frac{2\pi H^2}{c} \cdot K_{fs} + \frac{2\pi H}{c} \cdot \frac{K_{fs}}{\alpha} + \pi \cdot a^2 \cdot K_{fs} \quad \text{Ecuación 6}$$

donde a (L) es el radio del pozo y H (L) la altura de agua dentro de él.

Los dos primeros términos de la ecuación anterior representan el flujo de agua a través del fondo y de las paredes del pozo debido al gradiente de presión. El primero considera el flujo en condiciones saturadas y el segundo considera el efecto de la zona no saturada que rodea el pozo. El tercer término se refiere al flujo gravitacional.

Reynolds y Elrick (1986) recomiendan expresar el factor C mediante una solución numérica que se expresa como:

$$C = 4 \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \sinh^{-1} \left(\frac{H}{2 \cdot a} \right) - \sqrt{\left(\frac{a}{H} \right)^2 + \frac{1}{4} + \frac{a}{H}} \right] \quad \text{Ecuación 7}$$

Permeámetro de Guelph

El permeámetro de Guelph (Fig. 3) es una modificación del permeámetro presentado por Talsma y Hallam (1980). Este permeámetro consiste en un dispositivo Mariotte construido con dos tubos intrínsecos que actúan como depósito manteniendo la carga hidráulica constante en un hoyo practicado en el suelo. Se determina el valor de conductividad hidráulica saturada en campo por medio de un procedimiento numérico, a partir de mediciones de velocidad de flujo infiltrándose en estado estacionario.

El proceso de infiltración en un suelo no saturado es un proceso tridimensional que debería alcanzar el flujo permanente rápidamente y dentro de la región húmeda (Philip, 1969). En el permeámetro de carga constante como el usado en esta investigación el flujo hacia el exterior del pozo se supone¹¹ que es permanente y el suelo que lo rodea uniforme, isotrópico, saturado y poroso (Xiang, 1994).

¹¹ Suponer y asumir no son sinónimos en español como ocurre con el verbo *to assume* en inglés (Nota de los editores)



Figura 3. Permeámetro de Guelph utilizado en el campo (Fotografía propia)

La recarga de flujo permanente desde un pozo cilíndrico, situado en un suelo uniforme e insaturado, se puede representar como (Reynolds y Elrick, 1986):

$$Q = (2\pi H^2/C) \cdot K_{fs} + \pi a^2 \cdot K_{fs} + (2\pi H/C) \cdot \phi_m \quad \text{Ecuación 8}$$

donde Q ($L^3 T^{-1}$) es el flujo de recarga permanente, H (L) es la carga hidráulica en el pozo, K_{fs} ($L T^{-1}$) es la conductividad hidráulica saturada de campo, ϕ_m ($L^2 T^{-1}$) es el potencial de flujo mátrico¹², a (L) es el radio del pozo y C es un factor adimensional que depende de la relación H/a .

El primer término de la Ecuación 8 describe los efectos de la carga hidráulica en la zona saturada, el segundo los efectos de la gravedad, y el tercero la zona no saturada, resumiendo los dos primeros términos de la Ecuación anterior, representarían la componente saturada del flujo fuera del pozo y el tercer término se referiría a la componente insaturada o “capilar” del flujo.

El factor de forma según la hoja de cálculo de la compañía *soil moisture* calcula de la forma siguiente:

$$C_1 = \left(\frac{H_1/a}{1.992 + 0.091 \left(\frac{H_1}{a} \right)} \right)^{0.683} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$C_2 = \left(\frac{H_2/a}{1.992 + 0.091 \left(\frac{H_2}{a} \right)} \right)^{0.683} \quad \text{Ecuación 10}$$

¹² El **potencial mátrico** es la parte del potencial total que se debe a las fuerzas de atracción del agua por la superficie de las partículas sólidas del suelo y a las fuerzas de atracción molecular entre las propias moléculas del agua (Angella, G., Frías, C., Salgado, R. 2016. Conceptos básicos de las relaciones agua-suelo-planta. INTA Ediciones. No. 93. https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta-conceptos_basicos_de_las_relaciones_agua_suelo_planta.pdf). Otra definición, detallada por Sandoval et al. (2007) es la siguiente: Según Reynolds et al. (2002) el potencial de flujo mátrico (Φ_m) es un indicador de la fuerza capilar de los poros en condiciones insaturadas de agua durante un proceso de drenaje o infiltración; ... las texturas gruesas, estructuradas o porosidades con agua, tienden a tener baja capilaridad en comparación a texturas finas, desestructuradas o porosidades secas. Luego, esta condición les significa a las texturas gruesas, bajos valores de potencial de flujo mátrico ... (https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-27912007000200004) [Nota de los editores]

Ya que se utilizó el arreglo de carga combinada de carga simple se determina el K_{fs} de las siguientes ecuaciones:

$$Q_1 = \bar{R}_1 \cdot 35.22 \quad \text{Ecuación 11}$$

$$K_{fs} = \frac{c_1 \cdot Q_1}{2\pi H_1^2 + \pi a^2 c_1 + 2\pi \left(\frac{H_1}{a} \right)} \quad \text{Ecuación 12}$$

$$\varphi_m = \frac{c_1 \cdot Q_1}{2\pi H_1^2 + \pi a^2 c_1 + 2\pi H_1} \quad \text{Ecuación 13}$$

El método de carga constante del permeámetro de Guelph, provee ventajas considerables en comparación con el método de carga variable (Porchet y doble anillo), ya que requiere de un menor tiempo para la prueba, menor cantidad de agua y se puede hacer fácilmente con un solo operario, a pesar que, es el que utiliza un instrumento de mayor costo económico (Alvarado-Batres, 2015), llevándose a cabo la ejecución, análisis y procesamiento de información de forma conjunta entre ambas instituciones.

Granulometría

El suelo está conformado por granos los cuales tienen diferente tamaño, van desde los grandes que son los que al momento de disgregar la muestra sus granos pueden ser observados a simple vista, hasta los granos pequeños, los que solamente pueden ser vistos con un microscopio. Su estudio da una idea de cómo es la estructura del suelo y de su posible comportamiento y alteraciones. Este es el principio para planear los ensayos de laboratorio que deben ser realizados.

La elaboración de la curva granulométrica forma parte del análisis granulométrico, proceso mediante el cual se determina la proporción en que participan los granos del suelo en los procesos hidrológicos. Esta curva se realiza en función de sus tamaños y a esa proporción se llama gradación del suelo. La curva granulométrica mediante el tamizado es un método sencillo, en el cual se filtra el material mediante una serie de tamices para un posterior análisis de las cantidades de material retenido. Este tipo de curvas es de gran importancia cuando se analiza la estructura del suelo, a su vez para poder determinar parámetros de percolación al determinar la gradación del suelo.

La importancia y utilidad del análisis granulométrico en los suelos granulares da una idea de su permeabilidad y, en general, de su comportamiento ingenieril. Para el caso de los suelos cohesivos donde este comportamiento depende más de la historia geológica del suelo no es aplicable. El análisis granulométrico permite estudiar el tamaño de las partículas y medir la importancia que tendrán según la fracción de suelo que representen.

Metodología

Capacitación participativa y de aprendizaje en campo en coordinación con municipalidades

Todas las municipalidades de El Salvador poseen unidades ambientales que, según la Ley del Medio Ambiente, tienen la función de supervisar, coordinar y dar seguimiento a las políticas, planes, programas,

proyectos y acciones ambientales dentro de su institución y para velar por el cumplimiento de las normas ambientales por parte de la misma asegurando la necesaria coordinación interinstitucional en la gestión ambiental, de acuerdo a las directrices emitidas por el Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN). Operativamente se convierten en la herramienta técnica de las alcaldías en materia ambiental y, por lo tanto, la actualización de conocimientos y la constante capacitación técnica es obligatoria para su buen funcionamiento. En este proyecto se realizaron diversas capacitaciones teóricas y de campo para que estas unidades obtuvieran los conocimientos necesarios del campo de la hidrogeología, que les permita una mayor amplitud en la evaluación de proyectos de desarrollo y problemática municipal.

Las capacitaciones están orientadas incluyendo, desde fundamentos básicos de la hidrogeología, geofísica, análisis físico de suelos y permeabilidad, todas ellas acompañadas con prácticas en campo y en laboratorio. Además, la organización y preparación logística ha sido realizada en un trabajo coordinado de la OPAMSS y la UES.

La revisión técnica y la retroalimentación de información sirven de insumo para la selección de puntos de muestreo, los cuales se fortalecen con los criterios técnicos fundamentados en la teoría como son los siguientes: El tipo de uso de suelo, geología, accesibilidad y tipo de suelo, además de promover la distribución de zonas de estudio. La muestra seleccionada debe responder a una representatividad del AMSS, para que los resultados sean apropiados a la realidad. En algunos puntos se hicieron pruebas de permeabilidad a diferentes estratos en mismo punto para entender su distribución y características de perfil.

A continuación, se presenta la distribución espacial de los puntos que fueron muestreados para granulometría y con resultados de permeabilidad (Fig. 4).

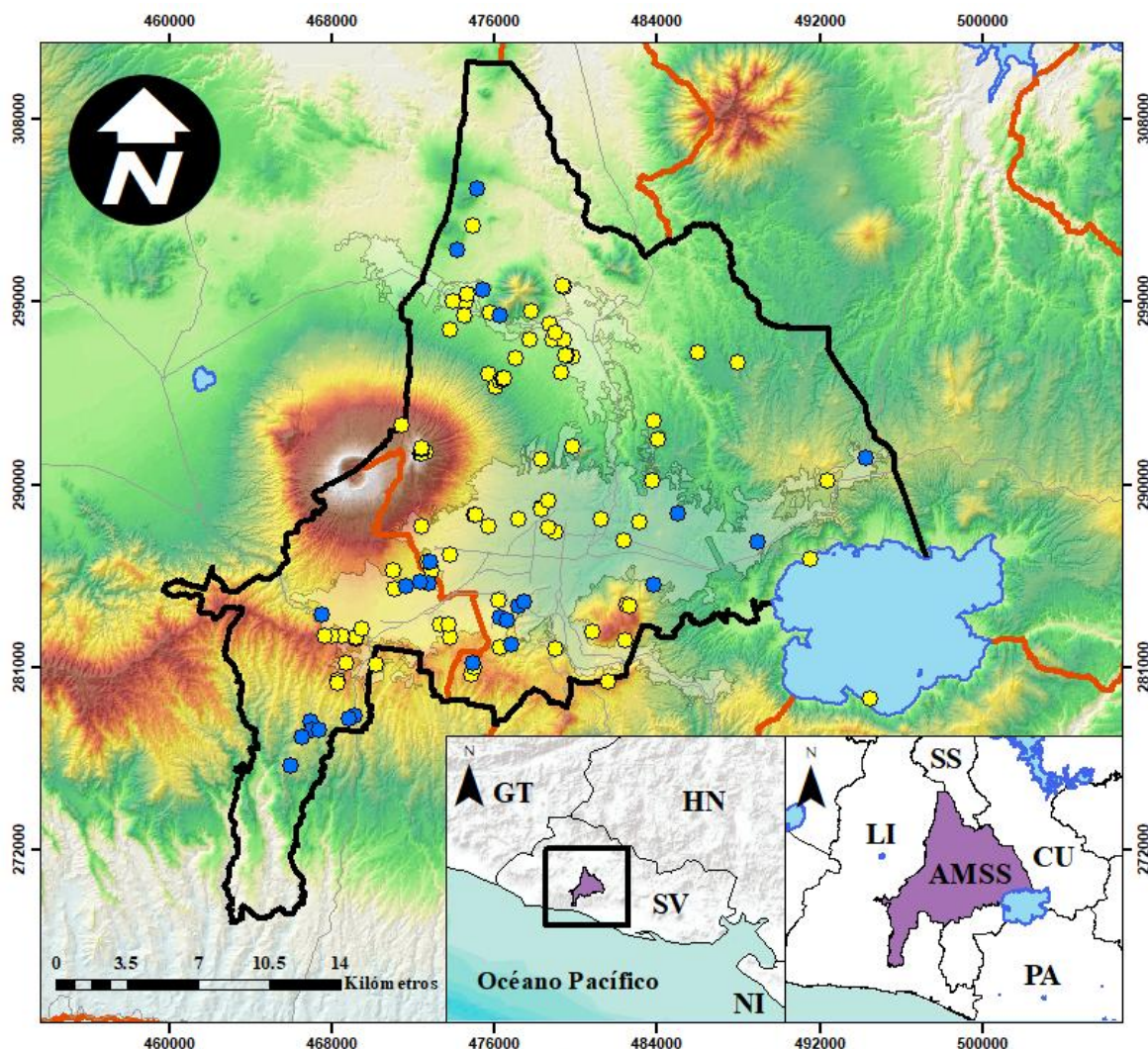
Protocolos de muestreo y ejecución de pruebas

Las curvas granulométricas permiten visualizar mejor la distribución de tamaños dentro de una masa de agregados y permite conocer además que tan fino o grueso puede ser. Las muestras de suelo fueron colectadas en puntos donde se realizaron las pruebas de permeabilidad. Los análisis granulométricos se realizaron mediante tamices de diferente numeración, la numeración depende de la separación de los cuadros de la malla.

Al realizar el análisis granulométrico de una muestra, se distinguen en las partículas 4 rangos diferentes de tamaños:

- Grava: Constituida por partículas cuyo tamaño es mayor que 4.76 mm.
- Arena: Constituida por partículas menores que 4.76 mm y mayores que 0.074 mm.
- Limo: Constituido por partículas menores que 0.074 mm y mayores que 0.002 mm.
- Arcilla: Constituida por partículas menores que 0.002 mm.

El método por tamizado se usa para obtener la distribución de los tamaños mayores de los suelos; generalmente se llega así hasta el tamaño correspondiente al tamiz No. 200 (0.075mm).



Proyecto
"Iniciando en Gestión del
Ciclo Hidrológico con Enfoque en
Aguas Subterráneas para Adaptación
al Cambio Climático en el AMSS"

Proyección Cónica Conformal de Lambert
Datum Norteamericano de 1927
Fecha: 5/2022
Escala: 1:265,000
Fuente: Laboratorio de Sistemas de
Información Geográfica



Financiado por la Unión Europea

**Mapa de puntos de muestreo de suelos
y pruebas de permeabilidad hidráulica en el
Área Metropolitana de San Salvador (AMSS)**

Leyenda

- Puntos de muestreo de suelos
- Pruebas de permeabilidad
- Cuerpos de agua
- AMSS
- Red vial
- Límites departamentales
- Zona urbana

En el marco del programa EUROCLIMA+ por medio de
subvención a la AECID y ejecutado por COAMSS/OPAMSS y UES



Figura 4. Mapa de ubicación de puntos de muestreo de suelo y pruebas de permeabilidad hidráulica

La muestra de suelo se hace pasar sucesivamente a través de un juego de tamices de aberturas cuadradas descendientes hasta el tamiz No. 200; lo retenido en cada tamiz se pesa y el porcentaje que representan respecto al peso de la muestra total se suma a los porcentajes retenidos en todos los tamices de mayor tamaño; el complemento al 100% de esa cantidad es igual al porcentaje de suelo que pasa por dicho tamiz. El juego de tamices (Fig. 5) a utilizar en el análisis granulométrico, se selecciona de forma tal que la abertura de la malla de cada tamiz sea el doble de la abertura de la malla anterior, colocándolos siempre de abajo hacia arriba; el primer tamiz de la serie será el tamiz No. 200 (0.075mm) a partir de la cual se aplicara la regla anteriormente definida.



Figura 5. Juego de tamices y resultado de una muestra tamizada

Estratigrafía

El modelo litológico se complementa con información relativa a la profundidad del nivel freático, transmisividad y geoquímica, obtenidos de registros de pozos, los cuales se recopilan para su procesamiento en el programa Rockworks 16, en el cual se realiza la interpolación de los materiales contenidos en los registros y se generan isocontornos de estos. El programa es muy versátil y permite distintas visualizaciones tanto en dos como en tres dimensiones, aparte de eso, la visualización de los resultados posibilita la interpretación de la relación de los materiales geológicos más superficiales, con los más profundos en función del tratamiento brindado a la base de datos de registros litológicos.

Se procesaron un total de 973 datos, de los cuales 767 proceden de levantamiento de mapa geológico y 206 registros de pozos profundos a lo largo del AMSS, con información de estudios como el de Barrera-de-Calderón (2010). La base de datos de la OPAMSS está constituida de la siguiente categorización de materiales: Lava, sedimento aluvial, sedimento deluvial, piroclásticos, toba y paleosuelo, suelo y arcilla. Además, se verificó por medio de afloramientos visitados el levantamiento de mapa geológico (Lexa et al. 2022). Los resultados obtenidos son de mucha ayuda en la planificación del territorio, por ejemplo, en los criterios de zonificación de infiltración. Para esto se importó de un archivo Gintlogs la base de datos y se procedió a visualizar la información litológica mediante modelos y secciones en dos y tres dimensiones respectivamente en el programa Rockworks 16.

Resultados y discusión

Los resultados de la granulometría de las muestras se visualizan en el siguiente gráfico (Fig. 6), del cual se puede observar que la clasificación de las muestras indican suelos limoso-arcillosos y muy pocas muestras tienen la categoría de arenas.

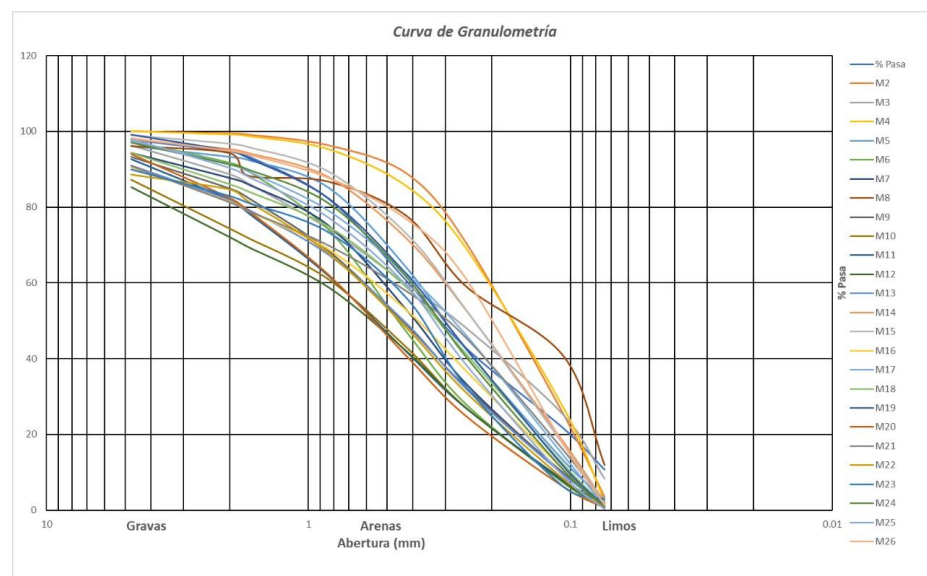


Figura 6. Curvas granulométricas de las muestras analizadas en el AMSS

A continuación, se muestra el mapa de puntos con permeabilidad (Fig. 7). Estos puntos han sido “levantados” con el método del permeámetro de Guelph, observándose que gran parte corresponde a moderado, moderado-lento y moderado-elevado. Las capas de escorias del volcán de San Salvador (G1 y G2), así como TB4 de la caldera de Ilopango son las que presentan permeabilidad elevada. Es de recalcar que están intercaladas entre paleosuelos con menor permeabilidad, además de permeabilidad secundaria observado por fracturas y raíces.

El proceso de laboratorio realizado para el análisis granulométrico de suelos por tamizado se siguió tal como lo indica la norma: ASTM D 421-58, de lo cual resultó que la muestra 23 puede clasificarse como arena fina en el sistema de clasificación AASHTO, debido que cumple con que 35% o menos que pasa el tamiz # 200; mínimamente el 51% pasa el tamiz No. 40 y como máximo 10% pasa el No. 200. Las demás muestras se pueden catalogar como limo-arenosas y arenas-limosas.

Con la información de los afloramientos visitados del levantamiento de mapa geológico se construyó una base de datos para obtener perfiles litológicos (Fig. 8). Esta base es para tener una idea de la estratigrafía en otras zonas y los criterios para infiltración aplicables

Asimismo, se realizaron distintas visualizaciones en dos y tres dimensiones de la litología contenida en la base de datos de registros de pozos profundos (Fig. 9).

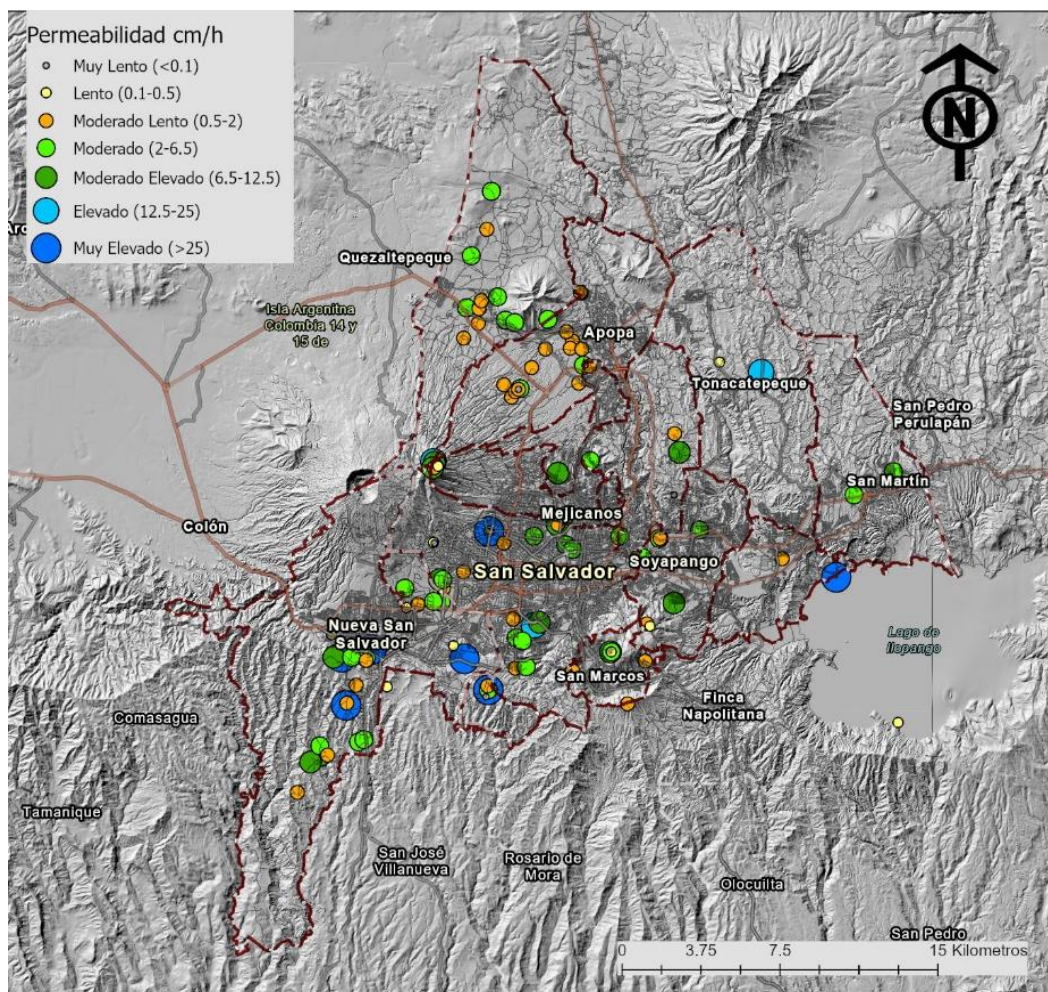


Figura 7. Mapa de ubicación de puntos con permeabilidad

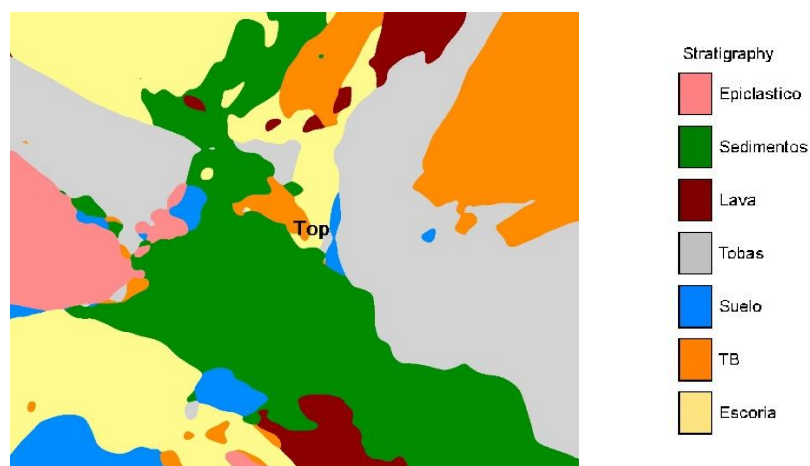


Figura 8. Modelo litológico de afloramientos superficiales

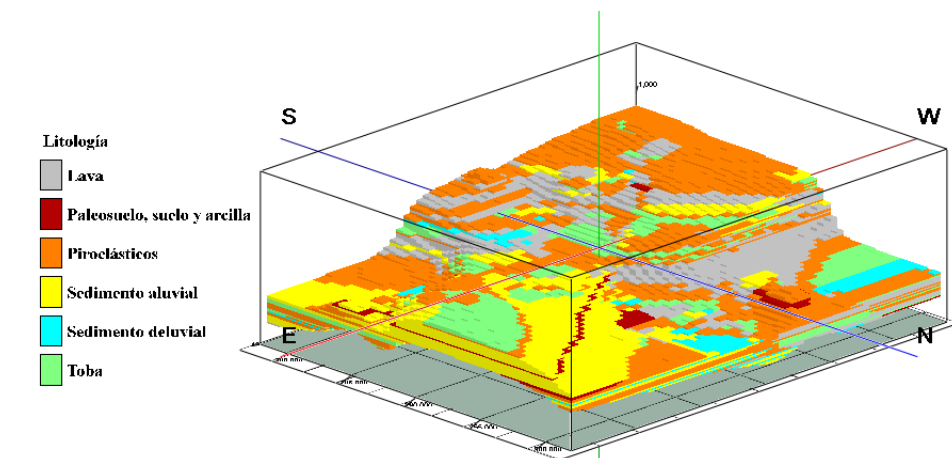


Figura 9.
Primera
visualización

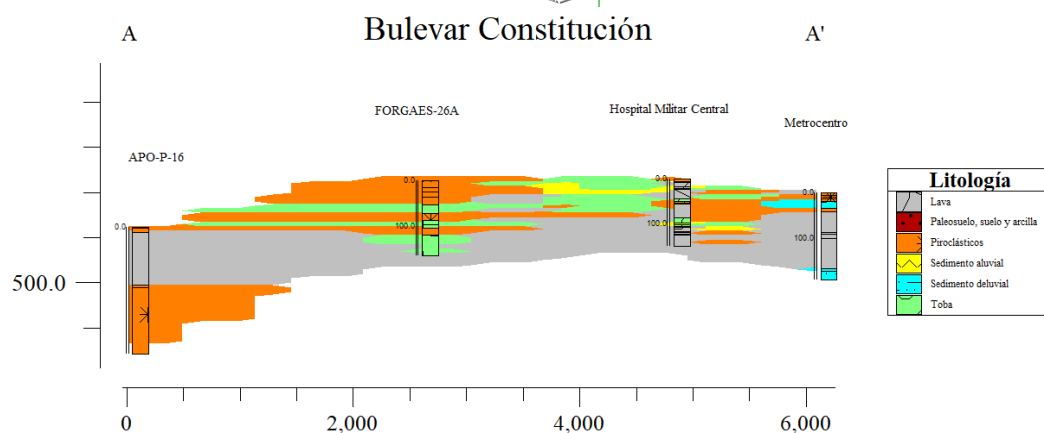


Figura 9. Modelos y
secciones litológicas
de registros de pozos
profundos y de
afloramientos
superficiales,
segunda
visualización

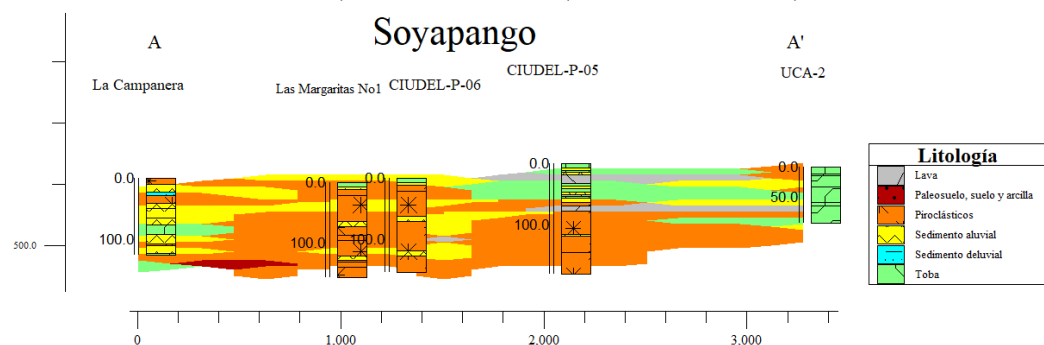


Figura 9.
Tercera
visualización

Análisis y discusión finales

En la cobertura superficial de la zona de estudio se encuentra la TBJ que presenta problemas de colapso, erosión y movimientos de ladera (Chávez et al., 2012). Este suelo al ser parcialmente saturado, al tener poca humedad, tiene una permeabilidad baja, pero a medida que se va saturando aumenta (Chávez et al., 2016). Esto quiere decir que tiene que pasar algún tiempo saturado para que empiece a moverse el agua. Además, hay unidades de TBJ que son muy finas y se convierten en barreras para el movimiento vertical del agua (Alfaro et al., 2019). Estas tefras muestran una permeabilidad de moderada lenta a moderada elevada en algunos sitios.

En la Figura 10 se muestra una estratigrafía típica de la Formación San Salvador (cerca del volcán de San Salvador) y cerca de la caldera de Ilopango hay espesores importantes de las Tierras Blancas y poca presencia de estratos de volcán de San Salvador. Puede observarse que hay capas intercaladas de mayor permeabilidad (escorias G1 y G2) y otras de menor permeabilidad (paleosuelos, por ejemplo). Generalmente se ven manantiales superficiales en G1, G2 y TB4.

Los suelos y material arcilloso muestran permeabilidad lenta a muy lenta; sin embargo, por permeabilidad secundaria relacionada con las fracturas/grietas o por las raíces esta puede ser mayor. En campo se puede ver (Chávez et al., 2016) que las raíces en TBJ son los planos de falla de derrumbes y flujos deslizantes.

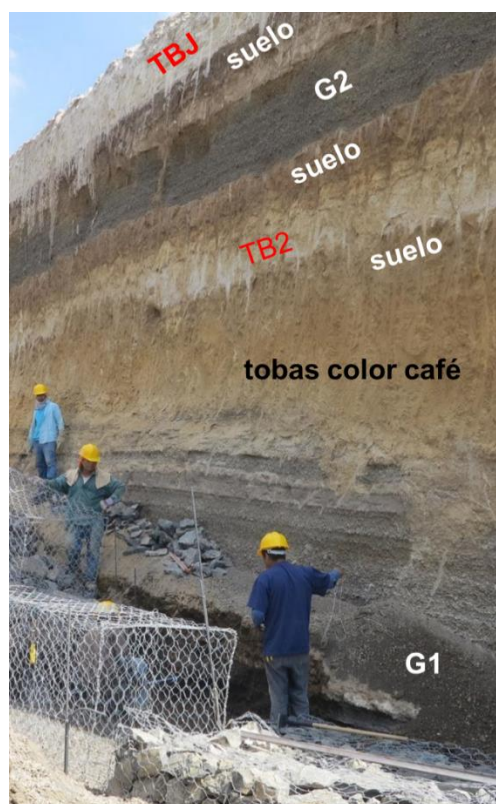


Figura 10. Estratigrafía típica en zonas cercanas a volcán de San Salvador (Lexa et al., 2022)

Para las pruebas de permeabilidad realizadas en este proyecto de investigación se consideraron los fundamentos teóricos de los métodos de carga constante y carga variable; donde se llevó a cabo un experimento de comparación de dichos métodos calculando los valores mediante el permeámetro de Guelph, el doble anillo de carga constante, el agujero para Porchet y el doble anillo con carga variable. Al analizar los resultados se puede concluir que es necesario tener con claridad metodologías y tiempos, ya que se deben tomar en cuenta para cada método, pues de lo contrario pueden ser sujetos a manipulación o interpretación errónea. Por ejemplo, los métodos de carga variable requieren menos costo en instrumentación; sin embargo, son necesarios más operarios que estén suministrando agua al proceso, por lo que también advierten de mayor cantidad de agua.

Por otro lado, el permeámetro de Guelph es mucho más caro, pero el consumo de agua es mucho menor que los otros métodos. También el tiempo requerido para la adquisición de datos es más rápido.

El método de doble anillo de carga constante es un instrumento de alto costo, requiere de al menos dos operarios, consume una gran cantidad de agua y fue el método que conllevó más tiempo.

Se puede decir que los métodos de carga variable están sujetos a una toma de datos de larga duración para obtener un resultado más apropiado al tipo de suelo donde se realiza, ya que, de no hacerlo así, se puede subestimar la tasa de infiltración. Por otro lado, los métodos de carga constante presentan valores con mayor control de los resultados. Además, es importante recalcar que cada método tiene sus objetivos y criterios específicos que hay que entender para su aplicación.

Algunos, como el permeámetro de Guelph, permiten obtener la permeabilidad, de la que se puede derivar la infiltración, pero la información debe analizarse con discreción.

Y así se tienen ventajas y desventajas de estos diferentes métodos.

Los sensores remotos pueden significar otros métodos indirectos de conocer presencia de humedad. Esta puede ser anómala si se analiza en época de verano, y puede estar relacionada a riego o a presencia de aguas subterráneas. En este caso, mediante índices de estrés de humedad como Sentinel 2, como se muestra en la Figura 11, pueden obtenerse datos confiables.

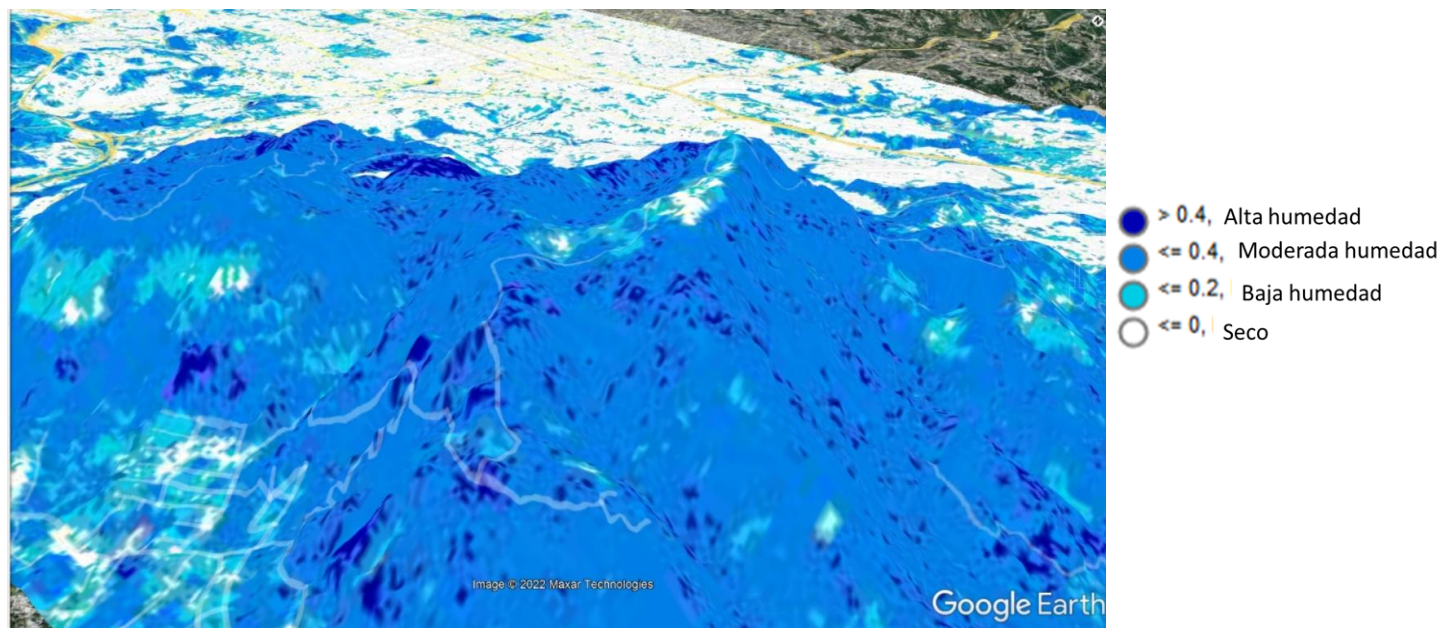


Figura 11. Mapa de estrés de humedad (Sentinel 2)

Como el nivel de las aguas subterráneas en las zonas urbanas se mantiene más de 35 m de profundidad (Rolo et al., 2004) se puede decir que en la superficie está en estado de suelo parcialmente saturado (presencia de agua, aire y suelo) y hay fuerzas capilares que actúan sobre la estructura del suelo

controlando el movimiento de agua entre poros. Rahardjo y Leong (1997) y Rahardjo et al. (2013) expresan que, para suelos parcialmente saturados, las curvas características de suelo-agua (curva donde se presenta cambio de contenido de agua con respecto a cambio de succión y que es muy usada para caracterizar estos suelos) pueden ser usadas para obtener y estimar indirectamente la permeabilidad. Para la estimación de la conductividad hidráulica en suelos parcialmente saturados (Lobbezoo y Vanapalli, 2002), se puede obtener de manera simplificada por medio de las propiedades del suelo como la granulometría, la conductividad hidráulica saturada, grado de saturación (o contenido de agua) en el suelo (usando la Curva de Retención Suelo-Agua (SWRC por sus siglas en inglés). El inicio de levantamiento de permeabilidad y granulometría es importante para ir caracterizando de mejor manera los suelos del sector.

Toda esta información de la que se ha iniciado su compilación en bases de datos sobre estratigrafía y permeabilidad/capacidad de infiltración tienen una meta para los municipios del AMSS, ya que se convierte en información valiosa para el diseño de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible, SUDS. Según Alfaro et al. (2019) para diseñar la capacidad de los dispositivos de infiltración o SUDS hay que valorar la topografía del sitio, flujo preferencial y descarga, potencial de infiltración y la capacidad del drenaje existente para determinar qué tipo de infraestructura usar, analizar los diseños o análisis de precipitación de tormentas, siendo necesario tener en cuenta los costos y beneficios.

Entre los dispositivos de infiltración se pueden mencionar los pozos, cunetas, lagunas y trincheras. La toma de decisiones sobre qué tipo de dispositivo de infiltración elegir es de gran importancia, puesto que puede afectar en zonas de construcción y colindantes.

Por ello, para tomar la decisión adecuada es necesario realizar un análisis de costo-beneficio, en donde se tomen en cuenta factores de beneficio respecto a funcionalidad, seguridad y riesgos. La selección de dónde se ubicará cada elemento deberá basarse en criterios como, por ejemplo, zonas donde no se encuentren fallas o se vean afectadas las construcciones.

Analizando la información obtenida se puede decir que el volumen infiltrado depende del tipo de suelo con el que se cuenta y su capacidad hidráulica, el espacio que ocuparán los dispositivos depende de la forma de estos y de la permeabilidad del suelo.

Una de las limitantes que se tienen en las ciudades es el poco espacio para la implementación de obras que benefician a la recarga hídrica, porque está de más decirlo, que el desarrollo de las ciudades alteran por completo la capacidad de infiltración que tienen los suelos en los sitios donde se establecen.

Entre los criterios técnicos desarrollados para la evaluación de la permeabilidad en los suelos del AMSS está la aplicación de un método que permita el cálculo de la conductividad hidráulica, ya sea por medio de carga constante o variable.

Para el caso de los métodos de carga variable, se tiene que hacer al menos una toma de larga data (aproximadamente 2 horas), para que sustente los valores obtenidos y, agregado a esto, debe garantizarse que en los suelos investigados no predominen las características de una infiltración baja y los contenidos de arcilla a nivel superficial tampoco sean exclusivos para los terrenos investigados.

Por otro lado, el método de carga constante (permeámetro de Guelph) ayuda con la determinación no solamente de la tasa de infiltración, sino también de la conductividad hidráulica, lo cual ayuda para el diseño de SUDS y, posteriormente, esta información es un componente para la elaboración del balance hídrico.

La determinación del balance hídrico del AMSS se ha visto fortalecido por los datos generados en campo de geología, infiltración, estratigrafía y características del suelo, lo que permite describir mucho mejor las propiedades del ciclo hidrológico y cómo interactúan las capas geológicas en el ciclo, sobre todo, de forma hidráulica.

Aunque existen diferentes metodologías para la estimación de recarga hídrica y el balance hídrico, todas se basan en los parámetros del ciclo hidrológico, aunque algunas hacen un mayor énfasis en algunas variables que otras, y la forma del procesamiento de los datos varía, e incluso la adquisición de los mismos. La confiabilidad de los resultados, independientemente del método a utilizar, depende principalmente de la información recabada en campo, investigaciones anteriores y monitoreo de los parámetros.

De ahí la importancia de este proyecto de investigación, ya que la información generada es un insumo vital para posteriores investigaciones, también, para llevar a cabo nuevas técnicas, para proyectarse a futuro sobre la influencia del cambio climático y para ejecutar obras de prevención y mitigación a los retos futuros de la gestión del recurso hídrico y la recarga acuífera del AMSS.

Conclusiones y recomendaciones

El Área Metropolitana de San Salvador está cubierta en la superficie por intercalación de productos recientes de la caldera de Ilopango y del volcán de San Salvador. La presencia de espesores importantes de TBJ en la zona oriental del AMSS hace que sea una zona de precaución para la infiltración si no se conoce bien la litología de la zona y sus propiedades hidrogeológicas, debido a que es un suelo colapsable y a que han aparecido erosiones subterráneas o cárcavas. El estrato TB4 que pertenece a la caldera de Ilopango presenta permeabilidad alta, de acuerdo con los resultados obtenidos de infiltración y granulometría. Los sectores cercanos al volcán de San Salvador donde hay mayor presencia y espesor de lavas y escorias (G1 y G2) podrían ser una zona factible para la infiltración. También se ve en campo la importancia de la permeabilidad secundaria relacionada con fracturas y raíces que provocan infiltración a pesar de que la permeabilidad de suelo sea baja o nula.

Esta información de permeabilidad más su ubicación de estratigrafía mediante modelos superficiales y profundos levantados con paqueterías como Rockworks 16 pueden ayudar en la toma de decisiones de sectores que pueden ser analizados para infiltración, esto puede ser mediante SUDS. Su implementación en sectores ya afectados por la urbanización puede ayudar a una regulación de las temperaturas del aire y de edificaciones, cuidado del agua, reducción de inundaciones, entre otros. Todos estos factores se orientan a la búsqueda de la sostenibilidad de las ciudades tomando en cuenta los escenarios de cambio climático donde se espera menos lluvia y aumento de temperatura, lo cual afectaría directamente al ciclo hidrológico y por tanto a la recarga de los acuíferos.

Con respecto a las pruebas de infiltración los resultados obtenidos demuestran que el uso del método de carga constante del permeámetro de Guelph resultó ser muy eficiente en la determinación de infiltración para los diferentes tipos de suelo del AMSS. Además, se facilitó mucho el cálculo de la conductividad hidráulica de los mismos. Por otro lado, estos resultados son coherentes con los análisis granulométricos de suelo.

Finalmente, la coordinación de todos los actores en este tipo de proyectos es fundamental para obtener resultados que incidan en todo el AMSS, ya que se obtuvo la participación de las autoridades municipales, ministerios, instituciones de abastecimiento del recurso hídrico y universidades; donde se logró integrar las capacidades técnicas de cada una de ellas para la construcción de estos insumos y que posteriormente han sido divulgados en los términos que cada uno tiene interés. Agregado a esto, la experiencia que se ha tenido puede ser replicada en otros sectores del país y también para otros proyectos del país.

Glosario

Siglas y términos	Significado/Meaning
AMSS	Área Metropolitana de San Salvador, El Salvador, Centroamérica
ANDA	Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados
AECID	Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo
Cárcavas	Conjunto de zanjas o conjuntos de canales que se desarrollan sobre capas de materiales no consolidados de la superficie terrestre. En la terminología internacional se les conoce como “badlands”
COAMSS	Consejo de Alcaldes del Área Metropolitana de San Salvador
EUROCLIMA	Programa de la Unión Europea sobre el Clima
Ignimbritas	Rocas volcánicas formadas por la unión o consolidación de depósitos finos de cenizas volcánicas y nubes ardientes, durante enormes explosiones de material piroclástico
Lateritas	Suelos rojos de las regiones tropicales húmedas afectados por la meteorización, específicamente química, pobres en sílice y ricos en hidróxidos de hierro y aluminio.
MARN	Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador, Centroamérica
OPAMSS	Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador, El Salvador, Centroamérica
SUDS	Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible
SWRC	Curva de Retención Suelo-Agua (por sus siglas en inglés, <i>Soil-Water Retention Curve</i>)
TBJ	Tierra Blanca Joven
Tefras	Material piroclástico no consolidado producido por una erupción volcánica
Tobas	Rocas ígneas consolidadas de edad geológica antigua que se forman a partir de los escombros expulsados por una erupción volcánica explosiva
UES	Universidad de El Salvador, Centroamérica
Volcanes dacíticos extrusivos	Estructuras de extensión limitada denominadas colectivamente domos de lava, que representan flujos lentos debido a las altas viscosidades de la composición de la lava produciendo erupciones explosivas

Reconocimientos

Los autores desean reconocer el apoyo recibido por parte del Consejo de Alcaldes del Área Metropolitana de San Salvador (COAAMSS), de la Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (OPAMSS), del programa EUROCLIMA+ de la Unión Europea, de la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID) y de la Escuela de Física de la Universidad de El Salvador (UES), del Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador, Centroamérica (MARN), de la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA) y de los técnicos municipales de 14 municipios del AMSS.

Referencias bibliográficas

- Alfaro, I., Chávez, J., Cuestas, I., Mejia, C., Landaverde, M., Campos, S. 2020. Estudio sobre infiltración y su relación con la geología del Área Metropolitana de San Salvador, El Salvador. *Revista Geológica de América Central*. 63: 1-17. doi:10.15517/rgac.v63i0.43401, ISSN: 0256-7024.
- Alvarado-Batres, C.A. 2015. Modelo conceptual de la parte oeste de la cuenca del río Suquiapa, Santa Ana, El Salvador. Tesis de Maestría. Universidad de Costa Rica. UCR. San José, Costa Rica.
- Alvarado-Batres, C., Barahona-Palomo, M. 2017. Comparación de tres métodos de infiltración utilizados para calcular el balance hídrico del suelo, en la cuenca del río Suquiapa, El Salvador. *Revista de Investigación UNED*. 9(1): 23-33. doi:https://doi.org/10.22458/urj.v9i1.1674
- Barrera-de-Calderón, M.L. 2010. Caracterización hidrogeoquímica e isotópica de áreas de recarga en el acuífero de San Salvador. Tesis de Maestría en Gestión de Recursos Hidrogeológicos, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de El Salvador. San Salvador, El Salvador, Centroamérica. <https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/548/1/10136964.pdf>
- Chávez, J.A., Hernández, W., Kopecky, L. 2012. Problemática y conocimiento actual de las tefras Tierra Blanca Joven en el área metropolitana de San Salvador, El Salvador. *Revista Geológica de América Central*. 47: 117-132. <https://www.scielo.sa.cr/pdf/rgac/n47/a06n47.pdf>
- Chávez, José Alexander, Landaverde, J., López-Landaverde, R., Tejnecký, V. 2016. Monitoring and behavior of unsaturated volcanic pyroclastic in the Metropolitan Area of San Salvador, El Salvador. *SpringerPlus*. 5(1): 1-24. doi:10.1186/s40064-016-2149-x
- Conacher, A., Sala, M. 1998. Las causas de degradación terrestre. John Wiley & Sons Ltd. Nueva Jersey, Estados Unidos.
- Dengo, G. 1968. Estructura geológica, historia tectónica y morfología de America Central. Centro Regional de Ayuda Técnica. Agencia para el Desarrollo Internacional (A.I.D.). México.
- Gómez-Gutiérrez, A., Schnabel, S., Lavado-Contador, F. 2011. Procesos, factores y consecuencias de la erosión por cárcavas; trabajos desarrollados en la península ibérica. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*. (55): 59-80.
- Jiménez-Steer, I., Rodríguez-Domínguez, L. 2008. Diagnóstico de la infiltración y permeabilidad en los suelos de la zona de recarga del acuífero Morroa en el área Sincelejo, Corozal y Morroa. Tesis. Programa de Ingeniería Agrícola, Facultad de Ingeniería, Universidad de Sucre. Sincelejo, Colombia.
- Kostiakov, A. 1932. The dynamics of the coefficient of water percolation in soils and the necessity for studying it from a dynamic point of view for purpose of amelioration. *Society of Soil Science*, 14, 17-21.

- Lexa, J., Šebesta, J., Hernández, W., Chávez, J.A., Vásquez, M.E., Alfaro, I.A. 2022. Geología del Área Metropolitana de San Salvador (1:50 000), El Salvador. *Revista Geológica de América Central*. 66: 1-23. doi:10.15517/rgac.v0i66.49972
- Lobbzoo, J.P., Vanapalli, S.K. 2002. A simple technique for estimating the coefficient of permeability of unsaturated soils. Presented in Niagara Falls. https://www.researchgate.net/profile/Sai-Vanapalli/publication/255579329_A_SIMPLE_TECHNIQUE_FOR_ESTIMATING_THE_COEFFICIENT_OF_PERMEABILITY_OF_UNSATURATED_SOILS/links/565cd86f08ae1ef92981fb2b/A-SIMPLE-TECHNIQUE-FOR-ESTIMATING-THE-COEFFICIENT-OF-PERMEABILITY-OF-UNSATURATED-SOILS.pdf?origin=publication_detail
- Lucero-Morán, C. 2018. El Estado y las garantías constitucionales: Formación de cárcavas en las colonias de San Salvador. *Entorno*. (65): 82-94. <http://portal.amelica.org/ameli/journal/366/3661551010/>
- Mata, R., Puiguriguer, M. 2000. El Salvador, El “País de las Hamacas”. Los riesgos geológicos. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, pp. 261-269.
- Miranda, K., Santos, P. 2014. The mayor council and the Planning office for Metropolitan Area of San Salvador, as a model for urban management. *Lincoln Institute of Land Policy*. Cambridge, Estados Unidos.
- Philip, J.R. 1969. Theory of infiltration. *Advances in Hydrosiences*. 5: 215–296. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4831-9936-8.50010-6>
- Rahardjo, H., Leong, E.-C. 1997. Soil water characteristic curves and flux boundary problems. Presented in *Amer. Soc. Civil Eng.* Pp. 88-112.
- Rahardjo, H., Satyamaga, A., Leong, E.-C. 2013. Effects of flux boundary conditions on pore-water pressure distribution in slope. *Engineering Geology*. 165:133-142.
- Reynolds, W.D., Elrick, D.E. 1986. A method for simultaneous *in situ* measurement in the vadose zone of field saturated hydraulic conductivity, sorptivity and the conductivity-pressure head relationship. *Ground Water Monitoring Review*. 6(1): 84-95. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6592.1986.tb01229.x>
- Rolo, R., Bommer, J.J., Houghton, B.F., Vallance, J.W., Berdousis, P., Mavrommati, C., Murphy, W. 2004. Geologic and engineering characterization of Tierra Blanca pyroclastic ash deposits. En *Natural Hazards in El Salvador*. The Geological Society of America. Vol. 375. Pp. 55-67. <https://doi.org/10.1130/0-8137-2375-2.55>
- Talsma, T., Hallam, P.M. 1980. Hydraulic conductivity measurement of forest catchments. *Australian Journal of Soil Research*. 18(2): 139-148. <https://doi.org/10.1071/SR9800139>
- Xiang, J. 1994. Improvements in evaluating constant-head permeameter test data. *Journal of Hydrology*. 162(1-2): 77-97.