

Estudio sobre infiltración y su relación con la geología del Área Metropolitana de San Salvador, El Salvador

Study on infiltration and its relationship with the geology of the Metropolitan Area of San Salvador, El Salvador

Ingrid A. Alfaro¹, Jose A. Chavez^{1*}, Irving E. Cuestas², Carlos J. Mejía², Miguel Landaverde²
y Susan Campos²

¹Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (OPAMSS),
San Salvador, El Salvador

²Universidad de El Salvador, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela de Ingeniería Civil,
San Salvador, El Salvador

*Autor para contacto: alex.chavez@opamss.org.sv

(Recibido: 12-04-2020; aceptado: 12-05-2020)

RESUMEN: En el Área Metropolitana de San Salvador el agua potable está en punto de estrés debido al cambio climático y el crecimiento urbano. Actualmente ocurren cambios en el ciclo hidrológico relacionados con la disminución de la infiltración y aumento de la escorrentía. El estudio de capas geológicas donde obras hidráulicas puedan ser factibles de construir o proyectar es el objetivo principal de esta investigación, considerando los beneficios, pero también teniendo en cuenta las posibles afectaciones, problemas en el sitio o infraestructura cercana. Muestras de suelo representativas fueron ensayadas en campo y laboratorio. Los resultados indican que los suelos tienen media-baja permeabilidad y que el agua infiltrada en las capas superficiales podría estar moviéndose horizontalmente debido a la litología en el área. Con la información geotécnica y geológica es posible obtener una zonificación preliminar y criterios para la infiltración artificial basada en las condiciones del suelo y la permeabilidad.

Palabras clave: Infiltración; permeabilidad; geología de El Salvador; SUDS; recarga; áreas urbanas, suelos volcánicos.

ABSTRACT: In the Metropolitan Area of San Salvador resources as water for human consumption is at the point of stress with climate change and increased urban growth. Changes currently occur in the water cycle related to decreasing infiltration and increasing runoff. The study of geological layers where hydraulics works might be feasible to construct or project, is the main objective of this research taking into account all the possible affectations or issues in the site or even in near infrastructure like buildings. Soil representative samples were tested in the field and in laboratory. Results indicate that the soils are of medium-low permeability and that water infiltrated in surface layers might be moving horizontally due the lithology in the area. With geotechnical and geological information is possible to obtain a preliminary zoning and some criteria for the artificial infiltration based in the soil conditions and permeability.

Keywords: Infiltration; permeability; El Salvador geology; SUDS; recharge; urban areas; volcanic soils.



INTRODUCCIÓN

La infiltración ha sido por mucho tiempo y en muchas ciudades, una buena práctica para el manejo de las aguas lluvias, principalmente en zonas urbanas, donde el cambio de uso de suelo, genera superficies impermeables, aumento de la escorrentía superficial y disminución de la infiltración natural. La capacidad de los suelos de infiltrar depende de la geología y de muchas características (contenido de humedad, costra o cobertura de suelo, ambiente, aspereza de superficie, contenido de materia orgánica, temperatura y capacidad de almacenamiento de agua según Huat, Ali y Low (2005) y Zhao, Wang, Liang, Wang y Wu (2013) siendo esto lo que determina la factibilidad para construir obras de infiltración. Además, se deben considerar posibles riesgos que las mismas obras podrían generar, como infiltración de aguas contaminadas, saturación de suelos en sectores cercanos a fundaciones de edificaciones, pudiendo provocar colapso, asentamientos o licuefacción al momento de un sismo, estos y otros posibles riesgos son de mucha importancia, tanto su evaluación como investigación.

El manejo de aguas de lluvias, lo cual incluye la infiltración ha sido empleado en muchos países del mundo desde la década de 1980 en ciudades como los Ángeles, Estados Unidos; Koganei, Japón y Tecámac, México (Fujita, 1997). El objetivo inicial de la infiltración en Tokio, fue la reducción de la escorrentía superficial que generaba inundaciones con altos grados de desastres en la ciudad, sin embargo, hoy en día, el objetivo principal es la recarga de agua subterránea, debido al crecimiento del interés internacional en controlar o disminuir los impactos del cambio climático favoreciendo la recurrencia natural del ciclo del agua (Fujita, 1997). En China e Inglaterra, el concepto de infiltración ha ayudado a resolver problemas de agua, y en respuesta, el concepto de “Ciudad de las Esponjas” fue presentado por el gobierno chino en 2013 (Dearden, Marchant y Royse, 2013; Liu, Jia y Niu, 2017; Tang, Xue, Li y Feng, 2015).

El crecimiento poblacional en el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS) ha provocado alta demanda de agua potable, llevando a estrés hídrico en los acuíferos aunado a periodos de sequía, hasta llegar a una situación de emergencia en el 2016 por la escasez de agua potable y en 2020 por contaminación. Además, hay fugas de hasta el 40% en tuberías de agua potable (Barrera, 2010), mal manejo de las aguas residuales, disminución de niveles en acuíferos y la urbanización que ha provocado el aumento de áreas impermeables y escorrentía superficial por mal manejo de las aguas lluvias (Barrera, 2010; MARN, 2010).

En El Salvador la temporada lluviosa ocurre de mayo a octubre. Siendo junio, septiembre y octubre generalmente los que tienen las máximas precipitaciones. Pudiendo ocurrir tres a seis días de lluvia contantes (temporales) en estos meses (García, 2009). La lluvia promedio anual para las estaciones meteorológicas Ilopango y Belloso dentro del AMSS es de 1800 mm (García, 2009). La evaporación potencial anual promedio es de 800-900 mm.

Dado la problemática sobre el agua, las instituciones del estado han enfocado sus esfuerzos en generar soluciones para los distintos problemas que se generan. Por tanto, la infiltración siempre está en discusión para conocer si puede ser una buena práctica para reducir los impactos mencionados anteriormente, o si esto podría aumentar la vulnerabilidad con respecto a la inestabilidad en suelos e incluso la contaminación del acuífero. El enfoque históricamente ha sido del manejo del agua lluvia mediante su conducción por tuberías a quebradas y ríos, sin embargo, se podría incentivar la infiltración de aguas lluvias en los nuevos proyectos, con el fin de controlar los volúmenes de escorrentía generados por la impermeabilización del suelo y además se podría estar contribuyendo a la recarga acuífera.

Iniciar la investigación del comportamiento de los suelos en procesos de infiltración natural y artificial es de vital importancia para actualizar la normativa existente y tener propuestas o zonas basadas en la condición del suelo y su respuesta ante la infiltración, sin dañar o generar efectos adversos en las zonas urbanas circundantes. La Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (OPAMSS), a través de su Reglamento a la ley de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Área Metropolitana de San Salvador y municipios aledaños (Diario Oficial, 1995), ya solicita a los nuevos proyectos de urbanización/construcción, dispositivos que incluyan la infiltración (Art. V.14) también hace un llamado a la investigación sobre las condiciones hidrogeológicas además de realizar pruebas de infiltración, tomando en cuenta la calidad de las aguas que se pretenden infiltrar. Actualmente, el periodo de retorno definido para las obras de control de escorrentía como sistemas de detención de 10 años, en casos en ríos y quebradas se debe considerar un periodo de retorno de 50 años (Art. V.14), sin embargo, se debe considerar también el periodo de retorno de diseño para el diseño de la infiltración de las aguas lluvias.

Geológicamente Lexa, Šebesta, Chavez, Hernandez y Pécskay (2011) (Fig. 1) clasifican a la formación Bálsamo como los restos de potentes estratovolcanes andesíticos, los cuales presentan meteorización y lateritas. La formación Cuscatlán está compuesta por ignimbritas extensas suprayacentes a la formación Bálsamo. Conteniendo también los volcanes dacíticos extrusivos

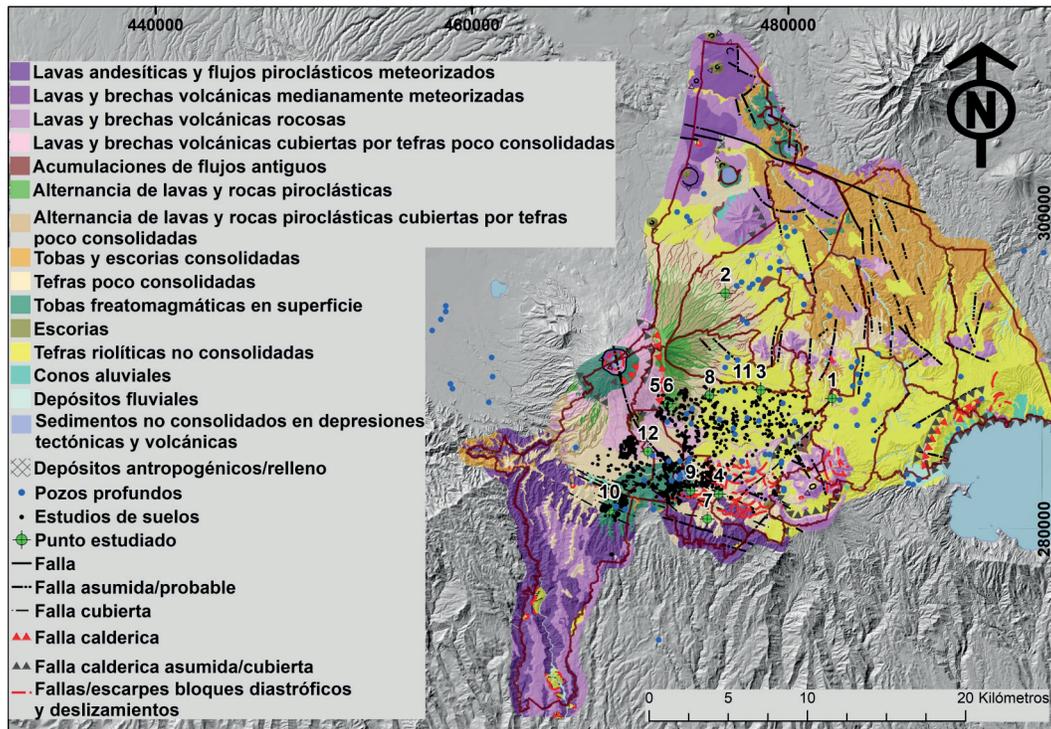


Fig. 1: Mapa Geológico simplificado del AMSS con puntos donde se realizaron pruebas.

de San Jacinto, Loma Larga. La Formación de San Salvador está compuesta por las unidades de Tefra del volcán San Salvador y las unidades de tefra de caldera de Ilopango. Las unidades de tefra están separadas por horizontes de suelo fósil y acumulaciones de depósitos eólicos (Lexa et al., 2011). Las lateritas y los horizontes de tefra suprayacentes inter-estratificados con el suelo fósil desempeñan un papel crucial en el movimiento de agua entre estratos. La descripción de las unidades geológicas estudiadas en campo y laboratorio se encuentra en Lexa et al. (2011) y en Lexa, Šebesta, Chavez, Hernandez (2019).

En cuanto a la recarga acuífera, según Barrera (2010), Gil (2007) y MARN (2012) las cabeceras de las subcuencas alrededor del complejo volcánico San Salvador (Fig. 2) presentan los mayores niveles de recarga del AMSS. Las subcuencas que nacen en la parte central de la AMSS, presentan niveles medios de recarga (esto debido a la confluencia de muchas variables, entre ellas la trama urbana, tipo de geología, la vegetación presente) y las subcuencas que presentan los menores rangos de recarga acuífera son las provenientes de la parte alta de la cordillera del Bálsamo que desembocan en el Océano Pacífico (aunque en su mayoría de la superficie poseen vegetación variada, desde bosques, cultivos y café, su baja recarga obedece más a las condicionantes geológicas).

Los mapas geológicos, geotécnicos e hidrogeológicos pueden ser instrumentos para la toma de decisiones preliminares identificando los principales factores geológicos que deben tenerse en cuenta durante una evaluación de sitio para conocer potencial de infiltración/recarga (Dearden et al., 2013).

En el AMSS, la región más problemática (Chavez, Landaverde, López y Tejnecký, 2016) pertenece a los depósitos de extensión y espesor importante de la tefra volcánica llamada Tierra Blanca Joven (TBJ) (Tefras riolíticas no consolidadas en Fig. 1), que es producto de la última erupción pliniana de la caldera de Ilopango (500-545 CE [Dull et al., 2019]), cuyos productos son una intercalación de caídas, surges u oleadas piroclásticas, flujos piroclásticos y episodios de erupciones húmedas (freatomagmática) y secas.

Según Chavez et al. (2016) Por los procesos de urbanización se ha modificado el relieve natural, se han rellenado bastantes quebradas en zonas de TBJ y durante los terremotos de 1965, 1986 principalmente se han dado problemas de asentamiento y daños en estas zonas (licuefacción posiblemente). También en las zonas donde el espesor de la TBJ es importante se dan problemas de erosión, movimientos de ladera, colapso de tuberías, casas, calles e infraestructuras en general.

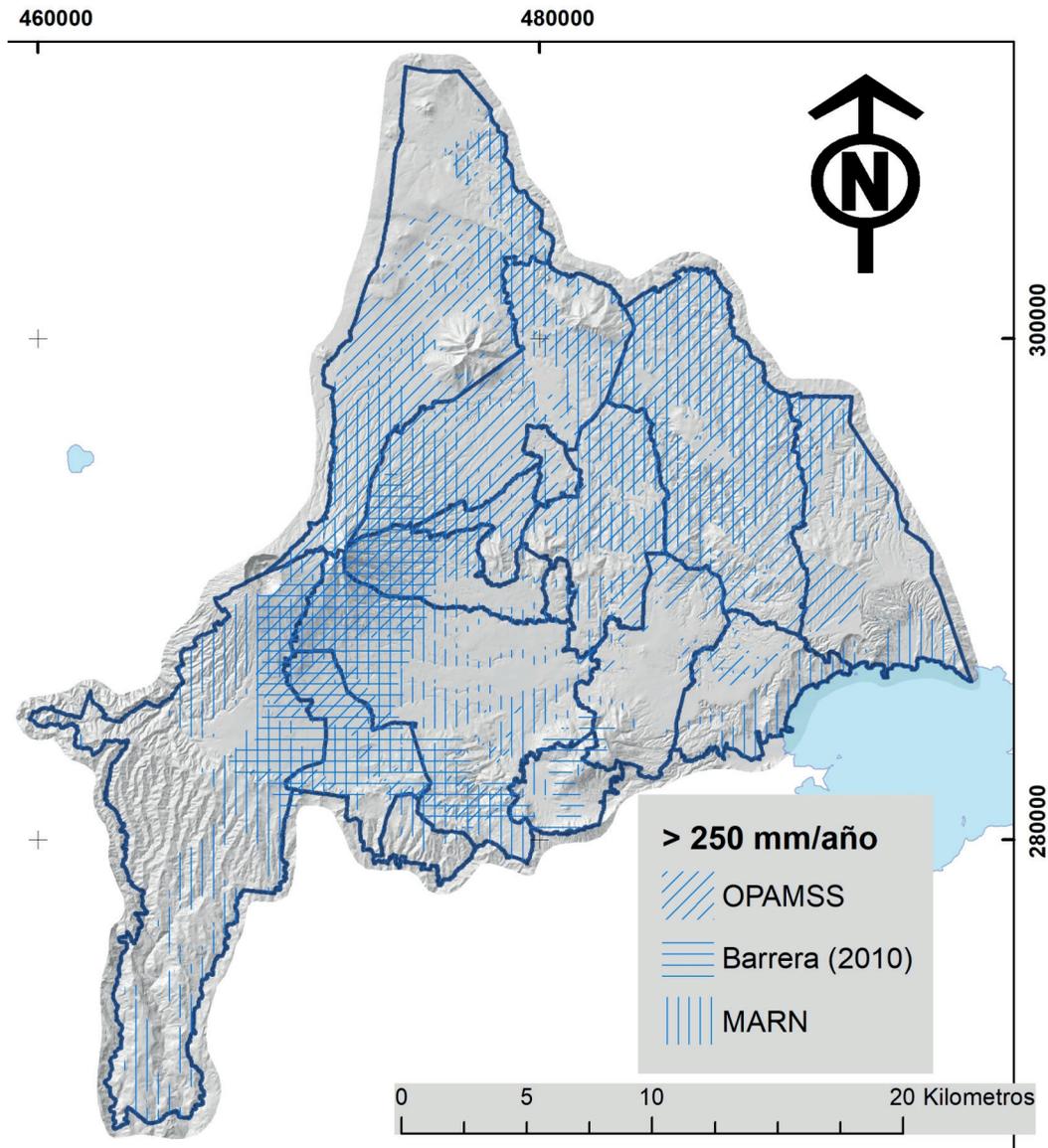


Fig. 2: Mapa con recarga acuífera mayor a 250 mm/año según (Barrera, 2010; Gil, 2007; MARN, 2012).

Dearden et al. (2013) dicen que algunos factores a tomar en cuenta para conocer viabilidad de infiltración/recarga se pueden mencionar la susceptibilidad a movimientos de ladera e inundaciones, posible elevación de nivel freático, pendiente, posible contaminación, permeabilidad, espesor de la zona parcialmente saturada, obstrucción de acuíferos, acuíferos colgados, suelos problemáticos, afecciones a otras zonas.

Para diseñar la capacidad de los dispositivos de infiltración o Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) hay que valorar la topografía del sitio, flujo preferencial y descarga, potencial de infiltración y la capacidad del drenaje existente para determinar que infraestructura usar, analizar tormentas de diseño o análisis de precipitación de series temporales, siendo necesario tener en cuenta los costos y beneficios.

A continuación, se presentan las actividades, ensayos y resultados obtenidos en campo, así como pruebas de infiltración en laboratorio de suelos representativos del AMSS, que fueron monitoreados a través de muestras de suelos colocadas en cajas transparentes. Lo cual permite advertir el movimiento del agua y comportamiento de los suelos cuando se da el proceso de infiltración.

METODOLOGÍA

Inicialmente se realizaron visitas a sitios donde se contaba información dentro del área de estudio, siendo muy útiles para escoger estratos a estudiar y procedimiento a realizar. Los puntos elegidos fueron contrastados con información de los mapas (figuras 1 y 2) geológicos, recarga acuifera e hidrogeológicos del AMSS (Barrera, 2010; Gil, 2007; Lexa et al., 2019; MARN, 2012). En la figura 1 se muestran los puntos de suelos muestreados para cajas transparentes en laboratorio y ensayos de permeabilidad de campo para analizar infiltración. No se evaluó la composición química de suelos. Los puntos estudiados son zonas representativas o donde se espera expansión urbana y representan la predominancia de los suelos en el AMSS, sin embargo, se valoró la tipología de la muestra, es decir, las características que debería de cumplir (contacto entre estratos, por ejemplo) que pudiera dar indicios sobre el movimiento de agua.

Además, se retomó la base de datos de pozos profundos de diferentes otras fuentes como Barrera (2010) y base de datos de OPAMSS, así como de estudios de suelos de Centeno, Cortez y Salguero (2018) y Escalante, López y Zepeda (2018) para crear un mapa de tipos de suelos y obtener perfiles litológicos por medio de *Rockworks 17* (Fig. 1). Resultados obtenidos pueden ayudar en los criterios de zonificación. Para esto se importó de *Gintlogs* la base de datos y se procedió a usar *Borehole Manager-Lithology-Model-Profile* en *RockWorks 17*.

Se tomaron valores de permeabilidad de campo y muestras para laboratorio para Unidad G de 1) TBJ (Arrupe), 2) unidad D de TBJ (Apopa), 3) unidad F de TBJ (UES), 4) escoria meteorizada de volcán de San Salvador (Mirasol), 5) contacto TBJ y flujo escombros (Carmen), 6) flujo escombros (Carmen), 7) roca meteorizada/arcilla (Huizucar), 8) contacto paleosuelo con escoria (75 avenida), 9) TB4 (Cumbres Cuscatlán), 10) Plan de la Laguna (Tenerife), 11) contacto unidades TBJ G y F (UES), 12) contacto TBJ y flujo de escombros (mezcla color café) (Jardines de la Sabana) (Fig. 1). Luego de saturar muestras estas se vibraron y se observó si había asentamientos con cargas de 0,20 kg/cm² y 0,50 kg/cm².

La manera de extracción de las muestras alteradas consistió; en primer lugar, en la identificación del estrato de suelo a extraer, evitando en lo posible alteraciones y pérdida de humedad. El proceso inicial de preparación en laboratorio de las muestras inalteradas consistió en tallarlas para instalarlas posteriormente dentro de las cajas de acrílico de dimensiones 40 x 40 x 40 cm, para visualizar la tendencia de la dirección del agua y la cantidad de agua que entra y sale de la caja para cada tipo de suelo estudiado (Hou, Vanapalli y Li, 2018; Qian, Huo y Zhao, 2010) teniendo en la parte inferior un desagüe donde se conecta una manguera. Luego se dispusieron tubos PVC de diámetro de 3,5" y 4" en el centro de cada una de ellas y se les añadió agua gradualmente para ir las saturando. Las muestras se tomaron sin alterar para poder conocer la movilidad del agua dentro de ellas debido a su diferente granulometría, consolidación, presencia raíces y poros presentes (Fig. 3).

La finalidad de estas cajas es ver el movimiento del flujo de agua en los estratos, esto es posible ya que el acrílico es transparente, estas cajas poseen su respectiva tapadera, las cuales se colocan después que se introduce agua a las muestras con el fin que no pierdan humedad en el transcurso del día y la noche.

Se analizaron dos criterios para la obtención de la cantidad de agua a infiltrar en las muestras dentro de cajas transparentes, de manera que las cantidades de agua trataran de reflejar un comportamiento similar a los volúmenes de agua que precipitan en el AMSS, pero a la vez tratando de conocer la respuesta del suelo ante las precipitaciones, por ejemplo, los contenidos de humedad logrados en una época lluviosa, cuanto tiempo permanece el suelo en estado seco o húmedo, y poder obtener la cantidad de agua que más se apegue a las realidades de precipitación y contenidos de humedad de los suelos. El primer criterio consistió en obtener la cantidad de agua relacionado a eventos históricos de lluvia de la estación de Ilopango, la precipitación promedio obtenida fue de 4,77 mm por lo que se calculó que para el área de 0,16 m² de cajas transparentes la lámina de agua a utilizar fuera de 0,76 mm. También se analizaron las últimas tormentas representativas de El Salvador, que causaron daños y de gran volumen o intensidad de agua variando la lámina a usar entre 0,06 y 35,06 mm.



Fig. 3: Preparación (a) y puesta en laboratorio de muestras de suelo en cajas acrílicas para su saturación (b y c).

El segundo criterio se retomó de datos obtenidos de Chavez et al. (2016), donde se monitoreo la humedad de algunos taludes del AMSS, con equipo de medición de humedad (TMS3) y succión (tensiómetro). Basándose en el criterio de que la TBJ empieza a ser inestable cuando su saturación es mayor al 25%, se evaluó los volúmenes de precipitación que causaron las saturaciones de 20%, 25% y 30% en sectores monitoreados, y el tiempo en que tardó en lograrse esta saturación, con el fin de conocer la cantidad de días y volumen de agua que un suelo seco requiere para volverse en condición inestable de humedad (25%). En promedio y basado en los datos de humedad obtenidos del TMS3, el suelo tardaba 30 días en tener un porcentaje de humedad de 25%, se propuso 2,4 l/día como el volumen de agua a inyectar por 5 días de prueba.

Sin embargo, es de considerar que, por las mismas condiciones del suelo naturales, no absorbía las cantidades calculadas diarias o absorbía aún más cantidades de agua. Una vez instaladas las muestras para su ensayo se les agregó agua limpia de manera gradual y controlada dentro del agujero utilizando una probeta de vidrio de 1000 ml, luego se registró el tiempo en que el volumen de agua se infiltraba por completo, a la vez que se introducía agua en toda el área superficial de la muestra con la finalidad de saturarlas, todo lo anterior por un período de un mes para cada una de ellas.

Para pruebas de asentamiento, se incrementó el peso de la carga a medida que se evidenciaron cambios de asentamiento o fracturamiento del suelo. Se utilizaron cilindros de concreto y pesas de laboratorio para generar cargas de 0,20 kg/cm² y 0,50 kg/cm². Para la vibración se utilizó una mesa vibratoria de concreto con un controlador ajustable para variar la amplitud de la vibración lineal (0-1,58 mm). La amplitud de las vibraciones utilizadas fue entre 720 y 2160 vibraciones / min.

El método de ensayo para determinar la permeabilidad en campo (Fig. 4) fue el del pozo o agujero de nivel constante. Inicialmente se excavó un agujero cilíndrico de 6 cm de radio y 15 cm de profundidad en cada uno de los lugares de estudio y en los cuales se realizaron posteriormente ensayos de infiltración manteniendo la altura del agua dentro del agujero constante, lo que permitió obtener el coeficiente de permeabilidad (K) a partir de la relación entre el caudal infiltrado y el nivel de agua en el agujero. Para mantener el nivel constante, se utilizó el principio de Mariotte con el equipo Permeámetro de Guelph. El Permeámetro de Guelph consta básicamente de dos tubos uno grande que actúa como depósito de agua y otro de menores dimensiones que se pone en contacto con el suelo y lleva acoplado un sistema que permite mantener la carga hidráulica constante. Cuando el permeámetro se encuentra instalado, el nivel del agua dentro de los tubos comienza a descender producto de la infiltración del agua en el suelo, lo que permite determinar la velocidad de infiltración a través de la lectura en una escala en cm para medir el nivel de agua dentro del reservorio.

Debido a que la tasa de infiltración normalmente varía en el tiempo, debido a las características del flujo en un suelo parcialmente saturado (pues se van llenando gradualmente los poros con agua, la prueba se debe hacer con suelo saturado, de lo contrario el valor de infiltración varía ampliamente), es necesario hacer una cantidad de medidas de la velocidad y que dependerán de cuán rápido se alcance el régimen permanente. Se consideró que el régimen permanente es alcanzado cuando existan al menos 3 lecturas sucesivas iguales. El procedimiento se debe realizar para 2 alturas de agua distintas en el agujero (h=5 cm y h=10 cm) obteniendo con ellas el valor de la conductividad hidráulica en campo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las unidades del mapa geológico simplificado del AMSS (Fig. 1) muestra muy buena concordancia con lo observado en campo en puntos estudiados, pudiendo ser un medio apropiado para caracterizar preliminarmente la estratigrafía de zonas a caracterizar. Predominando en la superficie de las muestras estudiadas las tefras poco o no consolidadas.

Los resultados de laboratorio y campo (cuadros 1 y 2) concuerdan en general con parámetros reportados por la bibliografía en cuanto a tipo de suelo (Fetter, 2001; Weight, 2008), sin embargo, hay que valorar el estado de cada suelo en cuanto a nivel de meteorización, cementación, grietas y presencia de raíces que puede hacer variar los resultados. Obteniéndose en pruebas de campo y laboratorio que los estratos TB4, contactos con escorias o flujos de escombros y unidad F de TBJ son los que dejan pasar más agua o infiltración, relacionado a granulometría más gruesa. Alvarado (2007) haciendo uso de infiltrómetro de doble anillo obtuvo en TBJ valores en el sector norte que fluctuaban entre $4,16 \times 10^{-4}$ cm/s y $1,94 \times 10^{-4}$ cm/s estos valores están cercanos con resultados obtenidos en esta investigación.

Según Rolo et al. (2004) el nivel de las aguas subterráneas en las zonas más urbanas se mantiene en 35 m de profundidad esto significa que la mayoría de los suelos en el país son parcialmente saturados (presencia de agua, aire y suelo) y hay fuerzas capilares que actúan sobre la estructura del suelo controlando movimiento de agua entre poros. Rahardjo y Leong (1997) 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.

Chavez (2016) utilizó también el permeámetro de Guelph para medir la conductividad hidráulica *in situ*. En talud de UES (punto 3 de la figura 1) se hizo uso también de software RETC (Van Genuchten et al., 1991) para obtener la conductividad hidráulica completa usando la Curva de Retención Suelo-Agua (SWRC) (Fig. 5). Siendo los valores obtenidos de la curva de retención obtenida con el modelo Van Genuchten con variable n, m y el modelo de Conductividad de Mualem los más



Fig. 4: Pruebas de permeabilidad en campo. En Fig. 1, (a) corresponde a punto 4, (b) a punto 2 y (c) a punto 5 y 6.

cercanos a los valores reales medidos en el campo. Mostrándose diferencias de magnitudes de orden importantes cuando el suelo está completamente saturado o cuando está seco. Las diferencias en los resultados podrían estar conectados a diferentes tamaños de poro, vacíos, estructura, dificultad de que agua desaloje aire de poros y heterogeneidad del suelo *in situ*.

Para la estimación de la conductividad hidráulica en suelos parcialmente saturados Lobbezoo y Vanapalli (2002) propusieron su obtención 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]). Esto puede ser ampliado en el caso del Área Metropolitana de San Salvador para crear una base de datos ya que hay una diferencia importante en magnitud si el suelo está seco o saturado. Esto ayudará en simulaciones que se puedan hacer en software, buscando acercarse a la realidad, siendo importante corroborar con pruebas de campo.

Hay que valorar también, que según resultados de monitoreo de Chavez (2016) las raíces son las zonas donde el agua se mueve preferentemente. Esto se pudo observar en talud con arcilla de punto 7 de figura 1, donde se advirtió sectores más saturados. Esto indicaría una permeabilidad secundaria asociado a profundidad de raíces (Fig. 6). En muestra de laboratorio de TBJ unidad F (Punto 3 de la figura 1) se observó que agua se movió en zona preferente de raíces.

Además, se pudo observar que mientras estén con menor humedad que la de saturación ($< 25\%$) no inicia la infiltración, esto se observa en punto 3 de figura 1 con TBJ (Figura 15 de Chavez et al., 2016) donde ya saturado el suelo con más de 30% de humedad por algunos días se puede observar como el agua empieza a infiltrar hasta 1,28 m), mientras que cuando se mantuvo la superficie sin estar saturada no se observó infiltración significativa. Generalmente donde se moviliza agua en Tierra Blanca Joven se pueden observar trazas de meteorización (óxidos). También el crecimiento en superficie de TBJ de costras de suelo biológicas (mezcla de suelo, musgos, algas, líquen, micro-hongos y otras bacterias) ayudan a que la humedad se retenga, además de proteger contra la erosión y permitir infiltración (Chavez et al., 2016).

El uso de suelo, topografía (Fan y Hsiao, 2012), evapotranspiración, grietas, temperatura aire, vientos y vegetación tienen también influencia ya que las superficies con una superficie plana o dispereja (donde agua se puede acumular y por ende infiltrar) permite que humedad se mantenga gran parte del año y otras superficies con inclinación fuerte restringen la infiltra-

Cuadro 1
Resultados de pruebas de laboratorio y campo.

Muestra	Tipo de Suelo	Laboratorio (cm/s)	Campo (cm/s)	Humedad de Vibrado		Asentamiento	
				Previa %	Posterior %	0,2 kg/cm ²	0,5 kg/cm ²
1	1 Unidad G TBJ	3,27x10 ⁻³	1x10 ⁻⁵	22	-	No realizado	No realizado
2	2 Unidad D TBJ	6,57x10 ⁻⁴ a 1,4x10 ⁻³ *	4,33x10 ⁻⁴	20	-	1,5 mm	No asentó
3	1 Unidad F TBJ	1,74x10 ⁻³ a 6,78x10 ⁻⁴ *	2,96x10 ⁻³	19	-	No asentó	1 mm
4	2 Escoria meteorizada	1,53x10 ⁻³ a 7,78x10 ⁻³ *	5,04x10 ⁻⁵	25	-	No asentó	No asentó
5	3 Contacto TBJ y Flujo Escombros	4,24x10 ⁻³	1,06x10 ⁻³	33	34	No asentó	2 mm
6	3 Flujo Escombros	2,46x10 ⁻³	1,36x10 ⁻⁵	43	47	5 mm	14 mm
7	2 Roca meteorizada/arcilla	2,27x10 ⁻⁵	1,48x10 ⁻⁵	44	48	No asentó	4 mm
8	3 Contacto Paleosuelo y Escoria	4,55x10 ⁻⁴	8,09x10 ⁻⁵	36	39	No asentó	4 mm
9	3 TB4	1,06x10 ⁻¹	5,07x10 ⁻²	58	51	5 mm	4 mm
10	4 Plan de la Laguna	8,05x10 ⁻⁴	2,06x10 ⁻⁵	44	40	3 mm	4 mm
11	1 Contacto de Unidades G y F TBJ	2,89x10 ⁻³	4,48x10 ⁻⁴	38	37	No asentó	2 mm
12	5 Contacto TBJ y Flujo Escombros	1,49x10 ⁻³	1,05x10 ⁻⁴	37	36	No asentó	4 mm

*Dato al inicio y final del proceso de saturación.

Tipo de suelo según mapa geológico simplificado se clasifica en 1: tefras riolíticas no consolidadas; 2: tefras poco consolidadas; 3: alternancia lavas y rocas piroclásticas cubiertas por tefras poco consolidadas; 4: tobas freatomagmáticas en superficie; 5: lavas y brechas volcánicas cubiertas por tefras poco consolidadas

ción. La topografía es significativa también debido a que el agua acumulada dentro del suelo en algunas áreas, por ejemplo, donde el agua de escorrentía superficial se acumula y en áreas con depresiones topográficas (Kim, 2011). Esto se observó en Arrupe (punto 1 en la figura 1) donde Chavez et al. (2016) instaló más TMS3 para verificar la incidencia de la topografía y la concentración de la escorrentía superficial.

Se compiló información de datos de eventos de desastres ocurridos, como inundaciones, derrumbes, erosiones, movimientos de laderas entre otros (Fig. 7). Observándose que las zonas de *badlands*, llanuras aluviales, laderas tectónicas y laderas de erosión (Mapa Geomorfológico y Peligrosidad por Dinámica Superficial según Geomorfología [Šebesta y Chavez, 2019]) son las zonas más problemáticas.

El suelo más problemático es la Tierra Blanca Joven (TBJ) el cual si una muestra (no alterada o alterada) es saturada, hay una disminución de la resistencia al corte, si se compara con una muestra de humedad natural (Chavez et al., 2016; Rolo et al., 2004). Esto hace importante la valoración de la infiltración artificial en estos estratos. Según resultados de Chavez et al. (2016) los flujos deslizantes en TBJ ocurren cuando el contenido de humedad era > 30% y la succión antes y después de que sucedieran los flujos deslizantes fue < 10 kPa. Las zonas de falla ocurrieron a lo largo de las zonas de raíces, áreas con grietas y donde el agua de escorrentía superficial se concentra. Los taludes son afectados constantemente por flujos deslizantes pequeños a lo largo de toda su superficie.

Los puntos de deslizamientos y erosión suceden generalmente cerca de los escarpes y laderas, siendo la presencia de agua subterránea un factor detonante extra que podría incrementar la problemática. Es muy importante la información compilada de base de datos de puntos históricos ya que puede ser un criterio importante para la toma de decisiones en cuanto a zonas donde no es conveniente construir pozos de infiltración, irrigación o riego (Cho y Lee, 2001; Hou et al., 2018; Huat et al., 2005; Pagano, Reder y Rianna, 2018; Tang et al., 2015;). El uso de mapas geológicos, geomorfológicos, base de datos y perfiles litológicos obtenidos con esta investigación serán vitales para la toma de decisión en zonas factibles o peligrosas. El hecho que TBJ sea propensa a la erosión subterránea y licuefacción tiene que ser valorada siempre recomendándose continuar la investigación de infiltración. La estratigrafía de TBJ, y en general de la formación geológica San Salvador puede dificultar el

Cuadro 2

Resultados de pruebas de laboratorio con respecto a granulometría y vibración.

Muestra	Tipo de Suelo	Granulometría	Observaciones de Prueba Vibrado
1	Unidad G TBJ	Limo arenoso	A los 2 minutos el suelo libero agua y se licuó
2	Unidad D TBJ	Limo	La muestra presento licuación a los 8 minutos
3	Unidad F TBJ	Arena limosa	A los 8 minutos la muestra presento indicios de licuefacción
4	Escoria meteorizada	Arena medio graduada	Se vibró con carga de 0.55 kg/cm ² presentado falla y fractura en la base de la muestra
5	Contacto TBJ y Flujo Escombros	Limo/Limo con arena	Se observó agua saliendo a superficie pero no presento asentamientos, fracturas ni licuefacción
6	Flujo Escombros	Limo con arena	Paredes de caja acrílico más húmedas pero no presento asentamientos, fracturas ni licuefacción
7	Roca meteorizada/arcilla	Arcilla bien graduada	Pequeñas grietas en los costados, pero no presento asentamientos, fracturas ni licuefacción
8	Contacto Paleosuelo y Escoria	Arena con limo/Arena medio graduada	No sufrió cambio, en paleosuelo se notó humedad superficial. No presento asentamientos, fracturas ni licuefacción
9	TB4	Arena bien graduada	Salida de agua por manguera. La muestra comenzó a asentar en los laterales 9 m, se agregó una carga de 9.4 kg y asentó 7 mm en el área donde se colocó la carga
10	Plan de la Laguna	Arena mal graduada con limos	Se comenzó a fracturar y a colapsar. La muestra asentó 8 mm. Posteriormente se agregó carga de 9.4 kg y al finalizar asentó 2 mm. Luego de la vibración la muestra evacuó más agua
11	Contacto de Unidades G y F TBJ	Limo arenoso	Inicialmente la muestra presentaba fracturas y al iniciar vibrado estas presentaron mayor abertura. A la vez el agua ascendió había la superficie de la muestra. Posteriormente se agregó carga de 9.4 kg con que se asentó de manera bastante notoria en las paredes de la muestra 7 mm, 9 mm, 3.5 cm y 4.5 cm
12	Contacto TBJ y Flujo Escombros	Limo arenoso/Arena con limo	Salida de agua por manguera y se fueron presentando fracturas en las paredes de corte diagonal. La muestra se comenzó a licuar, mostro una ascensión de agua en la superficie. Se agregó carga de 9.4 kg y al finalizar asentó 4 mm y en otras partes de la muestra subió el nivel 3 mm. La muestra siguió licuándose mucho más y salió agua por manguera

movimiento vertical del agua en algunos sectores y podría en cambio primar el movimiento horizontal, esto hay que tomarlo en cuenta para tener criterios por ejemplo de profundidad o conveniencia en cuanto a la infiltración.

Además, se crearon perfiles litológicos basados en la información obtenida de base de datos de pozos profundos, estudios de suelo, estudios hidrogeológicos y la información de Calderón (2010), pudiéndose por medio del programa *RockWorks 17* generar perfiles litológicos cercanos a los puntos de extracción de muestras y de análisis (Fig. 8).

La TBJ cambia su espesor inesperadamente (12 m en paleovalles lejos de caldera de Ilopango). Al pie de las laderas y en depresiones hay espesores importantes de TBJ retransportada (Schmidth-Thomé, 1975). En las zonas con espesor importante de Tierra Blanca es donde mayor daño se ha reportado debido a terremotos (espesores mayores a 30 m). Cerca de caldera de Ilopango una perforación llego hasta 210 m sin alcanzar roca. Además, las series de tobas en su mayor parte han sido dislocadas (Schmidth-Thomé, 1975) y contienen agua freática en varios horizontes, situación que puede influenciar decisivamente sobre la estabilidad del subsuelo.

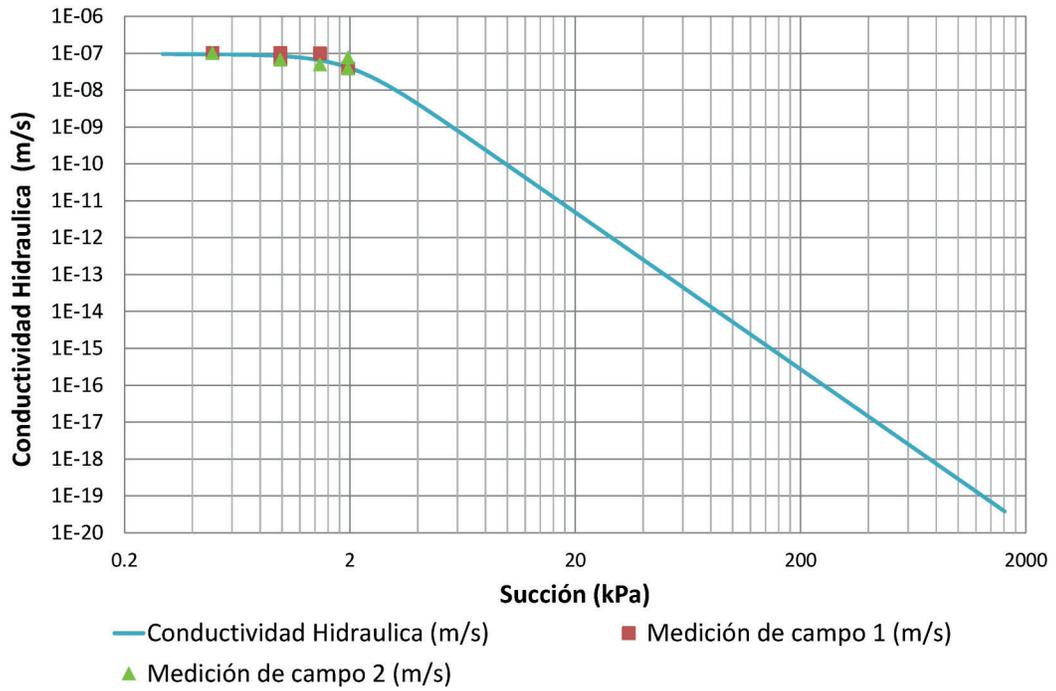


Fig. 5: Conductividad hidráulica (m/s) obtenida en el campo y usando la Curva de Retención Suelo-Agua (SWRC) (Chavez, 2016).



Fig. 6: Movimiento de agua preferencial por medio de raíces. (a) es roca meteorizada en punto 7 de Fig. 1 y (b) es unidad F de TBJ en punto 3 de Fig. 1.

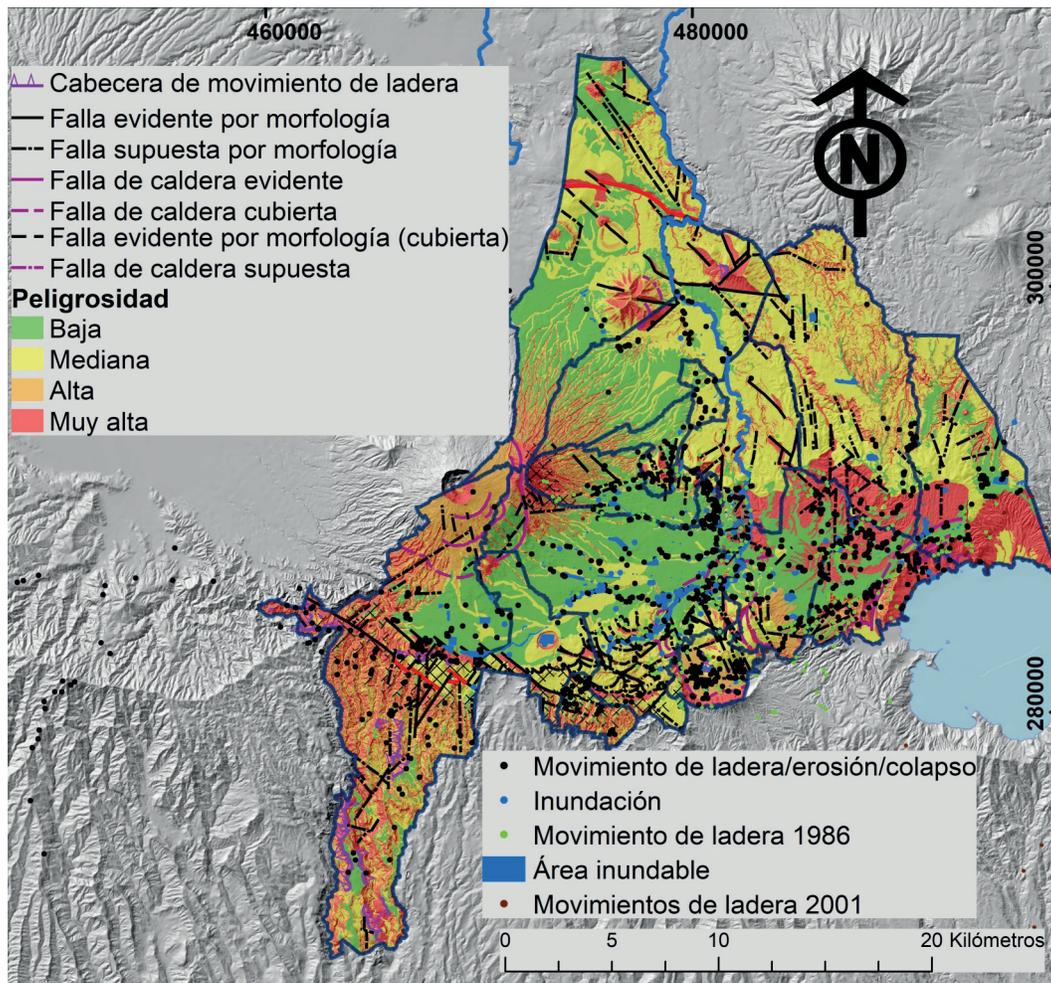


Fig. 7: Mapa de peligrosidad por dinámica superficial según geomorfología, que incluye puntos problemáticos de erosión, movimientos de ladera e inundaciones, según base de datos de OPAMSS, MOP, MARN y alcaldías (Šebesta y Chavez, 2019).

En el AMSS la geología es compleja debido a los procesos eruptivos (deposición de materiales), denudación y procesos tectónicos por lo que es preciso hacer investigaciones a detalle. El nivel de roca-suelo y propiedades hidrogeológicas son importantes para construir criterios y toma de decisiones. Zonas con presencia importante de lavas (Loma Larga, Cerro San Jacinto, Volcán de San Salvador entre otras) son zonas afectadas por fallamiento y están ubicadas en zonas activas sísmicamente. Las fallas pueden ser zonas donde el agua se infiltre y circule, pero también pueden ser zonas de barrera para las aguas subterráneas, por lo que conocer su posición, dirección y buzamiento es importante. Importante también identificar factores que pueden influir en la infiltración del agua, ya sea la tectónica o fracturas, erosión subterránea, raíces o madrigueras de animales (Tang et al., 2015). Zonas acuíferas fueron identificadas por Schmidh-Thomé (1975) siendo las principales TB4, escorias del volcán de San Salvador (G1 y G2), zonas con rocas de Formación el Bálsamo, la base de las lavas porosas y TB2 (capa abajo de Tierra Blanca Joven, TBJ), coincidiendo con lo obtenido en la presente investigación.

El conocimiento de la litología y granulometría es importante según Mazaheri y Mahmoodabadi (2012), ya que la infiltración, escorrentía y entrada de contaminación se aumenta entre mayor porcentaje de arena y disminuye al tener mayor cantidad de arcilla y limo y de materia orgánica. Esto hace importante la construcción de base de datos de suelos (que incluyan granulometría y propiedades físicas) ya que se pueden construir perfiles estratigráficos para la toma de decisión y conocimiento de movimiento de agua. Se tiene que continuar con investigación en campo y laboratorio para mejorar caracterización de análisis

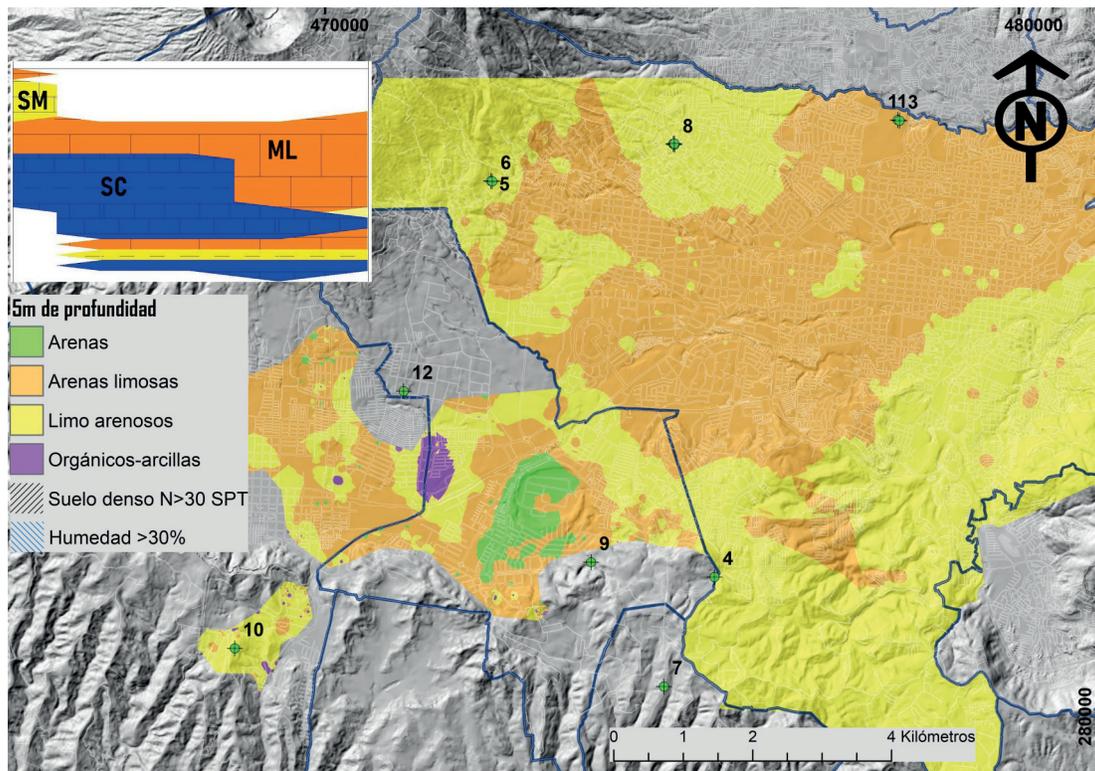


Fig. 8: Mapa que representa suelo a 5 m de profundidad, construido con interpolación del SIG de base de datos de estudio de suelos de SPT. Perfil corresponde a punto 8 y fue construido en *Rockworks 17*. SM limo arenoso, ML arenas limosas y SC arena arcillosa.

de permeabilidad en los tipos de suelos predominantes para poder tener la caracterización de permeabilidad de suelos en el AMSS, además de construir su respectiva base de datos.

El mapeo y creación de base de datos de sistemas de Sistemas de Drenaje Sostenible (SUDS) existentes (Dearden et al., 2013; Tang et al., 2015) retención/infiltración/recarga dentro de la zona de estudio será un trabajo a futuro, ya que se puede relacionar el comportamiento de sectores que han sido intervenidos y ayudará en concluir idoneidad y planificación en determinados sectores geológicos. Esto se puede complementar con base de datos de estudios de suelos, perfiles, estratigrafía, así como relacionarlos con humedad obtenido en estudios de suelo futuros. Con información que se presenta en esta investigación se puede comenzar a zonificar y complementar con nueva información.

La dispersión del agua en superficie, donde el agua de la corriente de ríos es desviada a terrenos vacíos después de las desembocaduras de los cañones y la dispersión en superficie que consiste en colocar pequeñas represas a través de los drenajes efímeros que drenan desde las partes altas podría no ser factibles de realizar actualmente en AMSS debido a que la mayoría de aguas grises y residuales no son tratadas antes de descargar en los drenajes naturales.

En el caso de El Salvador se ha valorado para esta investigación, los dispositivos de infiltración (SUDS) como pozos, cunetas, lagunas y trincheras tomando en cuenta los ensayos de infiltración de los suelos seleccionados del AMSS tanto en laboratorio, como en pruebas en campo. Uno de los dispositivos de infiltración que más han sido implementado es el pozo de infiltración. La localización de este tipo de dispositivo vertical ha sido idealizada para ser implementada en zonas rurales o semiurbanas, debido a que en estas áreas se minimiza el grado de contaminación del agua infiltrada hacia las capas profundas.

La toma de decisiones sobre qué tipo de dispositivo de infiltración elegir es de mucha importancia, puesto que su funcionalidad tendrá influencias tanto en el área de la construcción como en áreas donde ya existen otras obras; por lo que una mala decisión puede conllevar problemas de daños sobre sí mismos, a edificaciones y al propio suelo sobre el cual estará emplazado.

Por lo que, 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. Como una segunda prioridad se debe de evaluar la parte económica, ya que en ocasiones dos dispositivos diferentes pueden tener los mismos beneficios y la misma seguridad, es aquí donde se toma en cuenta cual dispositivo genera una menor inversión monetaria, tanto en la construcción, operación y mantenimiento. Para esta investigación se hizo el análisis del costo de cada elemento y los beneficios se puede hacer una valoración de que dispositivo es conveniente, el tipo de suelo es influyente en la elección de dispositivo de infiltración.

En el diseño de los dispositivos de infiltración realizado no se tomó en cuenta la calidad del agua, ni el diseño de tuberías desde la zona impermeable hasta donde estará colocado el dispositivo de infiltración. Uno de los costos que debe tomarse en cuenta también son las pruebas de campo y de laboratorio, las cuales son las más importantes para el diseño y la colocación de estos. 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 ocuparan los dispositivos depende de la forma de estos y de la permeabilidad del suelo. La selección donde se ubicará cada elemento será en aquellas donde no se encuentre falla o se vea afectada la construcción.

Para una urbanización de 5000 m² (como la que se tomó para el diseño) las franjas filtrantes serían una mala inversión, ya que el volumen aprovechable es bastante mínimo y el costo es elevado en comparación con las cunetas verdes, las que tienen una mayor ventaja y se puede ocupar el espacio de las franjas filtrantes para adecuar las cunetas y se genere un mayor volumen aprovechable y en su defecto las trincheras de infiltración, cuyo costo es aún menor que el de las cunetas verdes y tienen las mismas ventajas. En el caso de los pozos de infiltración, que es el que mayor costo tiene (aunque se aprovecha buena parte del agua lluvia), se tiene que evaluar si se cuenta con los recursos necesarios, al igual que las lagunas de infiltración (las cuales son los mejores para grandes volúmenes de escorrentía), pero están limitadas a espacios grandes.

Para el caso de las cunetas verdes, la cual tiene un costo medio y sus beneficios son buenos, se necesitan secciones largas para poder tener un excelente desempeño y la permeabilidad del suelo tiene que ser muy buena. Las trincheras tienen un costo bajo con funcionamiento muy bueno y que pueden aprovechar el volumen total generado por la lluvia y puede usarse con suelos que tengan baja conductividad hidráulica. Las lagunas de infiltración aprovechan el máximo volumen de escorrentía pluvial, pero necesitan grandes espacios de terreno y su costo es considerablemente alto. Los pozos de infiltración pueden aprovechar volúmenes de lluvia considerables; para el caso de las urbanizaciones que idealmente disponen de lotes amplios dotados de gran porcentaje de áreas verde, no obstante, y debido a su difícil construcción, su costo de construcción se vuelve elevado. Además, requiere un suelo con valores de permeabilidades de medias a altas y es imprescindible el mantenimiento.

CONCLUSIONES

Actualmente el AMSS es la zona que más problemas sufre debido a la afectación del ciclo hidrológico natural por la disminución de infiltración en el suelo, por lo que la investigación y análisis desde un enfoque del comportamiento del suelo es esencial para detallar que lugares son factibles para construir dispositivos de infiltración. La presencia de espesores importantes de TBJ en zona oriental del AMSS hace que sea una zona de precaución para la infiltración si no se conoce bien litología de la zona y sus propiedades hidrogeológicas. Los sectores cercanos al volcán de San Salvador donde hay mayor presencia y espesor de lavas y escorias podrían ser una zona factible para la infiltración.

El movimiento del agua entre los estratos del suelo es sumamente complicado de establecer; por lo que es importante hacer pruebas de campo y someter muestras de suelo a análisis de laboratorio donde sea posible observar el recorrido y dirección que tiene el agua mientras se infiltra en ellas. De forma generalizada en los suelos superficiales estudiados el movimiento de agua se da en forma vertical en estratos de suelos permeables y en forma sub-horizontal en la unión entre estratos con paleosuelos en donde se genera una franja que podría ser impermeable. Este conocimiento ayudará en la toma de decisiones en cuanto a estudios, conveniencia y profundidades a realizarlo.

Las pruebas de infiltración en campo fueron realizadas con un permeámetro de Guelph y con los resultados de pruebas en laboratorio en cajas transparentes, se clasificó a los suelos TB4 y escoria meteorizada como suelos permeables, a los estratos de TBJ, flujos de escombros y paleosuelos como estratos semipermeables, buenos para la infiltración y a los estratos de suelos de arcilla y Plan de La laguna como suelos impermeables que son malos para infiltrar agua.

A través de los ensayos de infiltración en laboratorio se pudo comprobar que los estratos de suelos TBJ son más susceptibles a colapsar cuando están completamente saturados durante un movimiento del suelo causado por sismos. En estos suelos se genera el efecto de licuefacción. En el caso de suelos como la arcilla, al llegar a un punto de saturación y ser sometidos a movimientos laterales, se generan grietas dentro de su estrato, que pueden causar fenómenos de desprendimientos en taludes. Los tipos de suelos TB4, escoria meteorizada, flujo de escombros, paleosuelo y Plan de La Laguna no sufren un mayor cambio al ser sometidos a movimientos horizontales (simulados como sismos), teniendo en ellos solo pequeños asentamientos.

La conductividad hidráulica de TBJ es media, pero para uso de dispositivos de infiltración sería una limitante en el diseño, ya que se pudo comprobar que el tiempo de infiltración de la TBJ para un dispositivo de infiltración era demasiado grande, lo cual la hace ineficiente (franjas filtrante) y este solo funciona adecuadamente si se aumenta el área de influencia (humedales), esto indica que para la aplicabilidad del dispositivo con TBJ requiere disponibilidad de espacio y que pueda retener la suficiente agua. Para el caso de los demás suelos como el caso de flujo de escombros, Plan de Laguna, arcilla y paleosuelo poseen una permeabilidad baja, lo que hace que implementar un dispositivo de infiltración en ese tipo de suelo, sería de poco provecho a menos que se use grande espacio de terreno para hacer que el volumen infiltrado sea mayor lo cual es un inconveniente, caso contrario en suelo como TB4 y escoria meteorizada, los cuales posee una permeabilidad alta, haciendo más fácil la aplicación de los dispositivos de infiltración.

Las capacidades de los dispositivos de infiltración o SUDS pueden ayudar a una regulación mejorada de las temperaturas del aire y del edificio, seguridad mejorada del suministro de agua, la reducción del riesgo de inundación, etc., todos contribuyen a la mejora de la resiliencia al clima actual y futuro, además de sus beneficios directos.

Se recomienda realizar un programa de investigación que incluya construcción de base de datos de pozos profundos, SUDS construidos, pruebas de infiltración, permeabilidad y granulometría, esto ayudara en la toma de decisiones para la ciudad.

AGRADECIMIENTOS

Deseamos reconocer apoyo recibido de Consejo de Alcaldes del Área Metropolitana de San Salvador (COAMSS), la Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (OPAMSS), Agencia Andaluza de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AACID) y Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de El Salvador (UES). Agradecemos a las personas que revisaron este artículo y editores especialmente a Asdrúbal Vargas y Percy Denyer, cuyos comentarios mejoraron su calidad.

REFERENCIAS

- Alvarado, C. (2007). *Modelo conceptual y vulnerabilidad intrínseca del acuífero Quezaltepeque-Nejapa* (Tesis de pregrado inédita). Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador.
- Barrera, M. (2010). *Caracterización hidrogeoquímica e isotópica de áreas de recarga en el acuífero de San Salvador* (Tesis de maestría inédita). Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador.
- Centeno, Y. R., Cortez, L. J., y Salguero, M. S. (2018). *Elaboración de mapa de características geotécnicas de los municipios de Antiguo Cuscatlán y Santa Tecla y propuesta de requerimientos mínimos en estudios geotécnicos para muros de retención, taludes y edificaciones de menos de tres niveles* (Tesis de pregrado inédita). Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador.
- Chavez, J. A., Landaverde, J., Lopez, R., y 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

- Chavez, J. A. (2016). *Monitoring and behavior of unsaturated volcanic pyroclastic* (Tesis de doctorado inédita). Universidad Técnica Checa en Praga, Praga, República Checa.
- Cho, S. E., y Lee, S. R. (2001). Instability of unsaturated soil slopes due to infiltration. *Computers and Geotechnics*, 28, 185-208.
- Diario Oficial. (1995). *Reglamento a la ley de desarrollo y ordenamiento territorial del Área metropolitana de San Salvador y de los municipios aledaños con sus anexos (76, 327)*. Recuperado de <https://www.transparencia.gob.sv/institutions/opamss/documents/reglamento-de-la-ley-principal>
- Dearden, R. A., Marchant, A., y Royse, K. (2013). Development of a suitability map for infiltration sustainable drainage systems (SuDS). *Environmental Earth Sciences*, 70(6), 2587-2602. doi: 10.1007/s12665-013-2301-7
- Dull, R. A., Southon, J. R., Kutterolf, S., Anchukaitis, K. J., Freundt, A., Wahl, D., ... Oppenheimer, C. (2019). Quaternary Science Reviews, 222, 105855. doi: 10.1016/j.quascirev.2019.07.037
- Escalante, K. J., Lopez, K. N., y Zepeda, H. A. (2018). Elaboración del mapa de características geotécnicas del municipio de San Salvador y propuesta de requerimientos mínimos en estudios de suelos para urbanizaciones, obras de protección, edificaciones de tres y más niveles (Tesis de pregrado inédita). Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador.
- Fan, C., y Hsiao, C. (2012). Role of topography in the behavior of the matric suction of unsaturated fill slopes. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 71, 61–69. doi: 10.1007/s10064-011-0383-6
- Fetter, C. W. (2001) *Applied hydrogeology*. New Jersey: Prentice-Hall.
- Fujita, S. (1997). Stormwater of urban sustainable water use. *Water Science and Technology*, 36(8), 289-293.
- García, L. (2009). Régimen de lluvia y caudales en El Salvador, su relación con la variabilidad climática (forzantes Oceánicos-atmosféricos) para la construcción de mapas de amenazas por déficit o exceso de lluvias (Tesis de maestría inédita). Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Gil, L. (2007). Mapa y estudio de recarga acuífera del Área Metropolitana de San Salvador, zona prioritaria No 1: faldas del volcán de San Salvador – cuenca del río Acelhuate. Recuperado de <http://geoportalopamss.org.sv/portal/index.php/view/map/?repository=07&project=AnexosReglamento>
- Hou, X., Vanapalli, S. K., y Li, T. (2018). Water infiltration characteristics in loess associated with irrigation activities and its influence on the slope stability in Heifangtai loess highland, China. *Engineering Geology*, 234, 27-37.
- Huat, B.B., Ali, F., y Low, T.H. (2005). Water infiltration characteristics of unsaturated soil slope and its effect on suction and stability. *Geotechnical and Geological Engineering*, 24, 1293-1306. doi: 10.1007/s10706-005-1881-8
- Kim, S. (2011). Time series modeling of the spatial distribution of soil moisture in a mountainous hillslope headwater. *Geosciences Journal*, 15(4), 423-431. doi 10.1007/s12303-011-0034-8
- Lexa, J., Šebesta, J., Chavez, J. A., y Hernandez, W. (2019). Elaboración de mapa geológico y su caracterización en escala 1:50,000. Recuperado de <http://geoportalopamss.org.sv/portal/index.php/view/map/?repository=07&project=AnexosReglamento>

- Lexa, J., Šebesta, J., Chavez, J., Hernandez, W., y Pécskay, Z. (2011). Geology and volcanic evolution in the southern part of the San Salvador Metropolitan Area. *Journal of Geosciences*, 56 (1), 105-140. doi: 10.3190/jgeosci.088
- Lobbezoo, J. P., y Vanapalli, S. K. (2002). A simple technique for estimating the coefficient of permeability of unsaturated soils. Presentado en *Proceedings of the 55th Canadian Geotechnical Conference*. Niagara Falls, Canadá.
- Mazaheri, M. R., y Mahmoodabadi, M. (2012). Study on infiltration rate based on primary particle size distribution data in arid and semiarid region soils. *Arabian Journal of Geosciences*, 5(5), 1039-1046. doi: 10.1007/s12517-011-0497-y
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN). (2010). *Impactos de cambios de uso de suelo en la escorrentía superficial en la cuenca del Arenal Monserrat en la ciudad de San Salvador en el periodo 1992-2009*. Recuperado de <http://portafolio.snet.gov.sv/digitalizacion/pdf/spa/doc00242/doc00242.htm>
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN). (2012). *Zonificación ambiental y uso de suelo de la Subregión Metropolitana de San Salvador (SRMSS)*. Recuperado de <http://www.marn.gov.sv/descargas/Menu/Temas/ZonificacionSanSalvador/San%20Salvador.pdf>
- Liu, H., Jia, Y., y Niu, C. (2017). “Sponge city” concept helps solve China’s urban water problems. *Environmental Earth Sciences*, 76(14), 473, s12665-017-6652-6653. doi: 10.1007/s12665-017-6652-3
- Qian, T., Huo, L., y Zhao, D. (2010). Laboratory investigation into factors affecting performance of capillary barrier system in unsaturated soil. *Water, Air, and Soil Pollution*, 206(1-4), 295-306. doi: 10.1007/s11270-009-0106-9
- Pagano, L., Reder, A., y Rianna, G. (2018). The effects of vegetation on the hydrological response of silty volcanic covers. *Canadian Geotechnical Journal*, 56(9), 1261-1277.
- Rahardjo, H., y Leong, E. (1997). Soil water characteristic curves and flux boundary problems. En S. Houston y D. Fredlund, (eds), *Unsaturated soil engineering practice* (pp. 88-112). Utah,: Geo-Institute of the American Society of Civil Engineers.
- Rolo, R., Bommer, J., Houghton, B., Vallance, J., Berdousis, W., Mavrommati, P., y Murphy, W. (2004). Geologic and engineering characterization of Tierra Blanca pyroclastic ash deposits. En W. I. Rose, J. J. Bommer, D. L. López, M. J. Carr y J. J. Major (eds), *Natural Hazards in El Salvador* (pp. 55-67). Colorado: Geological Society of America.
- Schmidt-Thomé, M. (1975). The geology in the San Salvador area (El Salvador, Central America) a basis for city development and planning. *Geologisches Jahrbuch, Reihe B: Regionale Geologie Ausland*, 13, 207-228.
- Šebesta, J. y Chavez, J.A., (2019). Mapa geomorfológico y peligrosidad por dinámica superficial según geomorfología. Recuperado de <http://geoportalopamss.org.sv/portal/index.php/view/map/?repository=07&project=AnexosReglamento>
- Tang, Y. M., Xue, Q., Li, Z. G., y Feng, W. (2015). Three modes of rainfall infiltration inducing loess landslide. *Natural Hazards*, 79, 137-150. doi: 10.1007/s11069-015-1833-4
- Weight, W. D. (2008). *Hidrogeology field manual*. New York: Mc Graw Hill.
- Zhao, L., Wang, L., Liang, X., Wang, J., y Wu, F. (2013). Soil surface roughness effects on infiltration process of a cultivated slopes on the loess plateau of China. *Water Resources Management*, 27(14), 4759-4771. doi: 10.1007/s11269-013-0428-7