

*Artículo Científico****Afectaciones por fenómenos hidromorfológicos en el área urbana del Distrito Metropolitano de Quito en el periodo 2010-2019******Urban area affectations due to hydromorphological phenomena Quito Metropolitan District for 2010-2019 period***Carlos Edison Ron Zambrano¹ , Karen Nathali Ceballos Peñafiel² ¹ Instituto Superior Tecnológico General Eloy Alfaro, carlosedison66@gmail.com, La Joya de los Sachas, Ecuador² Instituto Superior Tecnológico General Eloy Alfaro, kceballos@institutos.gob.ec, La Joya de los Sachas, Ecuador

Autor para correspondencia: natthi.ceballos@gmail.com

RESUMEN

Los fenómenos hidromorfológicos han experimentado un incremento en los últimos años, generando impactos socioeconómicos negativos y el aumento en la tasa de mortalidad asociada a estos eventos. Este fenómeno está vinculado a la deficiente planificación y ordenamiento territorial, que ha propiciado un crecimiento urbano descontrolado, acompañado de la gestión ineficiente de los recursos naturales, lo que ha incrementado los niveles de riesgo en las áreas urbanizadas. La presente investigación analiza las afectaciones derivadas de fenómenos hidromorfológicos en el área urbana del DMQ durante el período 2010-2019, mediante el análisis de datos de precipitaciones diarias, eventos hidromorfológicos y características geomorfológicas del territorio. Las precipitaciones fueron proporcionadas por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología y la Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito, mientras que los registros de eventos fueron extraídos de periódicos digitales locales. El procesamiento de la información permitió identificar 188 eventos de inundación y 49 movimientos en masa, con epicentros en el norte, centro y sur de DMQ. Se determinó que los umbrales de precipitación presentan variabilidad temporal y espacial, modulados por las condiciones geomorfológicas del territorio, la actividad antrópica, los efectos del cambio climático, y así como también por la distribución e intensidad de las precipitaciones.

Palabras claves: Fenómeno hidromorfológico; Precipitación; Intensidad; Umbrales de precipitación.

ABSTRACT

Hydromorphological phenomena have increased in recent years, generating negative socioeconomic impacts and a rise in the mortality rate associated with these events. This phenomenon is linked to deficient land-use planning and territorial management, which have led to uncontrolled urban growth, accompanied by inefficient natural resource management, increasing risk levels in urbanized areas. This study analyzes the effects of hydromorphological phenomena in the urban area of the Quito Metropolitan District (QMD) during the 2010–2019 period by examining daily precipitation data, hydromorphological events, and the geomorphological characteristics of the territory. Precipitation data were provided by the National Institute of Meteorology and Hydrology (INAMHI) and the Quito Metropolitan Atmospheric Monitoring Network (REMMAQ), while event records were extracted from digital local newspapers. Data processing identified 188 flood events and 49 mass movements, with epicenters in the northern, central, and southern areas of the QMD. It was determined that precipitation thresholds exhibit temporal and spatial variability, influenced by the geomorphological conditions of the territory, anthropogenic activity, the effects of climate change, as well as the distribution and intensity of precipitation.

Keywords: Hydromorphological phenomena; Rainfall precipitation; intensity; Precipitation threshold.

Copyright

Los originales publicados en las ediciones impresa y electrónica de esta revista son propiedad del Instituto Superior Tecnológico Universitario Rumiñahui, por ello, es necesario citar la procedencia en cualquier reproducción parcial o total. Todos los contenidos de la revista electrónica se distribuyen bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-4.0 Internacional.

**Citas**

Ron Zambrano, C., & Ceballos Peñafiel, K. (2025). Afectaciones por fenómenos hidromorfológicos en el área urbana del Distrito Metropolitano de Quito en el periodo 2010-2019. *CONECTIVIDAD*, 6(3). <https://doi.org/10.37431/conectividad.v6i3.307>

1. INTRODUCCIÓN

Los fenómenos hidromorfológicos que principalmente afectan la zona urbana del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) incluyen movimientos en masa, como caídas de roca, deslizamientos y flujos de lodo, así como inundaciones, hundimientos y granizadas (Ron, 2022). Se ha determinado que estas afectaciones están estrechamente relacionadas con el uso inadecuado del entorno urbano y rural, lo que ha llevado a la generación constante de nuevas áreas expuestas a estos eventos a lo largo del tiempo (Estacio y Rodríguez, 2012). El Plan Metropolitano de Ordenamiento Territorial del DMQ señala que alrededor del 72% de la superficie urbana es vulnerable a movimientos en masa, debido a diversas causas tanto naturales como antrópicas. Además, menciona que las inundaciones ocurrieron debido principalmente a la insuficiencia de la red de drenaje y al relleno de antiguas quebradas, con una frecuencia promedio de tres eventos de inundación por año. Por otro lado, los flujos de lodo se presentan, en su mayoría, en la periferia de la zona urbana y están estrictamente relacionados con el relleno de quebradas, como el aluvión ocurrido en la quebrada La Raya en 1989 y el de la avenida La Gasca en 1975, en la quebrada Pambachupa (Ron, 2022). Finalmente, el estudio señala que las malas prácticas en la construcción del alcantarillado de la ciudad han provocado diversos hundimientos en la calzada (Peltre, 1989).

Zona de estudio

El DMQ está dividido en 8 administraciones zonales, estas a su vez están divididas en 32 parroquias urbanas, que conforman la ciudad de Quito; y 33 parroquias rurales y suburbanas. Esta investigación abarca las parroquias urbanas que conforman el núcleo consolidado del DMQ (Ron, 2022). Entre ellas se incluyen Alangasí, Amaguaña, Atahualpa, Calderón, Carcelén, Centro Histórico, Chaupicruz, Chilibulo, Chillogallo, Cochapamba, Comité del Pueblo, Concepción, Cotocollao, El Condado, Guamaní, Iñaquito, Itchimbía, Jipijapa, Kennedy, La Argelia, La Ecuatoriana, La Ferroviaria, La Libertad, Magdalena, Mariscal Sucre, Ponceano, Puengasí, Quitumbe, Rumipamba, San Bartolo, San Juan, Solanda y Turubamba. (Figura 1) (MDMQ, 2012). Morfológicamente la zona de estudio se encuentra en el valle angosto que se forma entre el Complejo Volcánico Pichincha (CVP) y Atacazo al oeste y el levantamiento Lumbisí-Puengasí y El Batán-La Bota al este, en consecuencia, la urbe se ha visto obligado a crecer longitudinalmente y de manera desordenada para el aprovechamiento del espacio (Figura 2) (Alvarado, 2014)

Figura 1. Mapa de ubicación geográfica de la zona de estudio

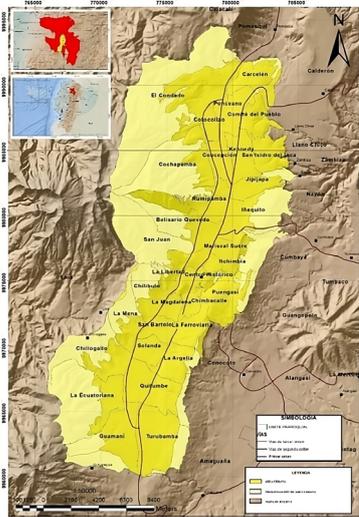
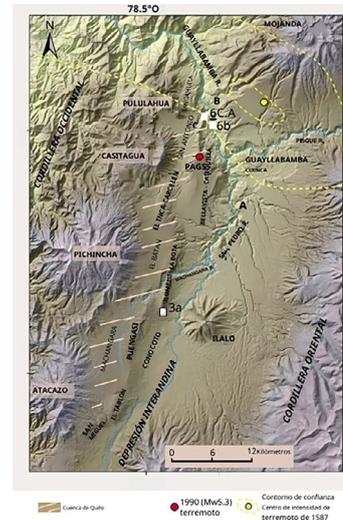


Figura 2. Sistema de Fallas de Quito y los volcanes alrededor del DMQ



Nota. Tomado de Alvarado (2014).

Caracterización Natural

Precipitación

Los parámetros principales de las precipitaciones, como intensidad, duración y frecuencia, tienen un rol crucial en la aparición de fenómenos hidromorfológicos en entornos urbanos. Un aumento en las precipitaciones intensifica la acumulación de agua en el suelo y subsuelo, favoreciendo la ocurrencia de distintos tipos de movimientos en masa. Además, el incremento del volumen de agua sobrepasa la capacidad de los sistemas de alcantarillado, generando inundaciones en las vías de la ciudad. La intensidad de la lluvia es el factor clave en el desarrollo de estos eventos, ya que supera la capacidad de los colectores de alcantarillado. En áreas urbanas con pendientes pronunciadas, precipitaciones de alta intensidad reducen la capacidad de almacenamiento en los colectores, aumentando el escurrimiento superficial (Ron, 2022).

Pendiente

Las pendientes del área urbana del DMQ van entre 0-15%, pero entre ellos sobresalen rasgos morfológicos como el panecillo que alcanza pendientes hasta de 25%. La zona montañosa que rodea a la urbe varía entre 25-50% (Figura 3).

Quebradas

La ciudad del DMQ es atravesada por dos importantes ríos, el Machángara y el Grande (Figura 4). Sin embargo, el relleno de quebradas sin la implementación de técnicas adecuadas ha alterado las condiciones naturales de infiltración, escurrimiento y estabilidad de las laderas, lo que ha incrementado la ocurrencia de movimientos en masa (Peltre, 1989).

Geología

Quito, debido a su ubicación rodeada de volcanes, los depósitos más representativos de la zona

corresponden a estratos volcánicos originados principalmente del volcán Atacazo y del Guagua Pichincha (Toscano, 2018).

Figura 3. Mapa de Pendientes del DMQ

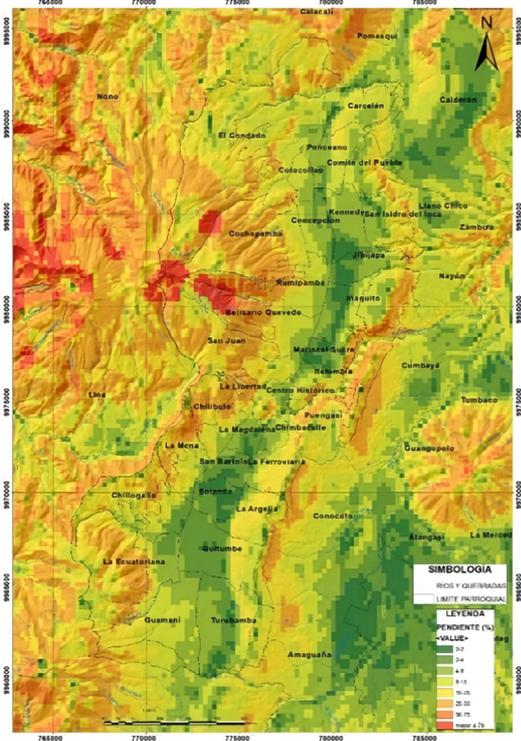
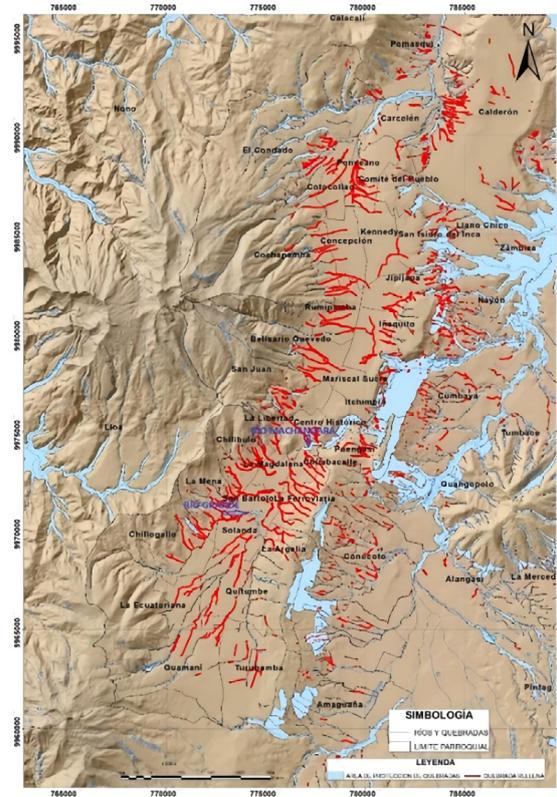


Figura 4. Mapa Hidrológico del DMQ



Geomorfología

En el Valle Interandino se han conformado diversas cuencas que se extienden de norte a sur, entre las cuales se encuentran Chota, Quito-Guayllabamba, Ambato-Latacunga y Riobamba-Alausí (Ron, 2022). Estas depresiones surgieron principalmente bajo un régimen transpresivo sin-sedimentario, acumulando depósitos de origen sedimentario y volcánico que contribuyeron a su relleno (Winkler et al., 2005). La depresión de Quito presenta una orientación aproximada de NS y se subdivide en dos subcuencas: la del sur y la del centro-norte, separadas por la elevación del Panecillo y el cauce del río Machángara. Su configuración está influenciada por el sistema de fallas inversas de Quito y, desde el punto de vista geomorfológico, está compuesta por depósitos fluvio-lacustres y volcánicos (Ron, 2022). Estos materiales han modelado una cuenca de forma rectangular y superficie escalonada, con pendientes que varían entre el 5 % y el 30 % (Toscano, 2018).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Metodología

Recopilación de información

Figura 5. Mapa de ubicación de las estaciones meteorológicas seleccionadas

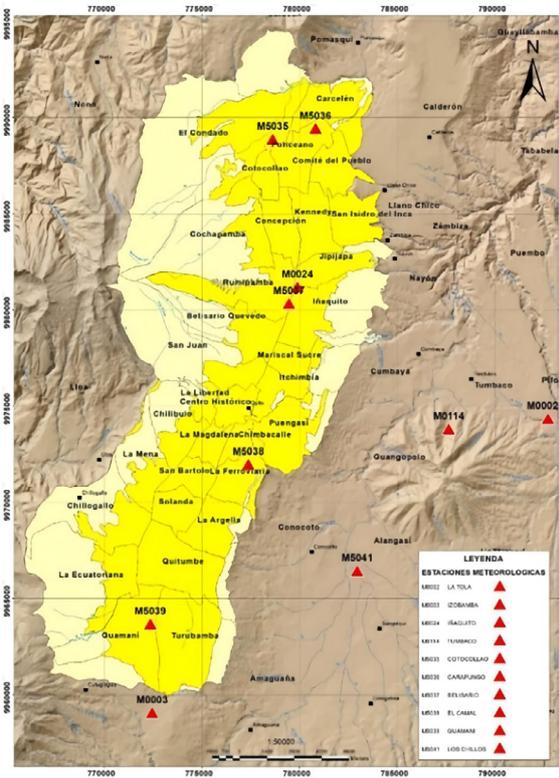
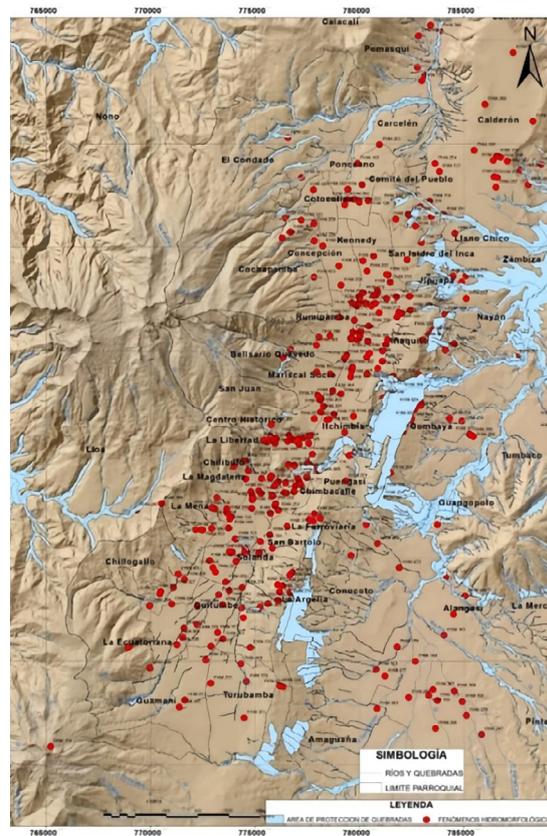


Figura 6. Geolocalización de eventos de fenómenos hidromorfológico 2010 - 2019



Nota. Datos tomados en el formato (WGS 84/Zona 17S).

En el desarrollo de esta investigación se obtuvieron dos conjuntos de datos. El primero incluye registros diarios de precipitación y temperatura, proporcionados por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) y la Red Metropolitana de Monitoreo de la Calidad del Aire de Quito (REMMAQ). El segundo conjunto fue elaborado a partir de la recopilación de reportes sobre impactos causados por las lluvias en el DMQ, obtenidos de versiones digitales de periódicos.

Para la identificación y clasificación de los daños derivados de fenómenos hidromorfológicos, se empleó la plantilla que se presenta en la Tabla 1. Para el estudio de las lluvias se eligieron diez estaciones meteorológicas (Tabla 2), los cuales corresponden a estaciones meteorológicas activas. Estas estaciones están ubicadas tanto dentro como en las inmediaciones del área de análisis. La Figura 5 ilustra la disposición geográfica de las estaciones meteorológicas seleccionadas.

Tabla 1. Formato para la recopilación de eventos por fenómenos hidromorfológicos.

ENCABEZADO	CÓDIGO	FECHA	CARACTERÍSTICA PRECIPITACIÓN	FENOMENO HIDROMORFOLOGICO	POSIBLE CAUSA	UBICACIÓN	SECTOR	REFERENCIA	DESCRIPCIÓN
EJEMPLO	FHM-092	18/9/2018	precipitaciones intensas	caída de roca	S/D	Quito	El Trebol	Av. General Rumiñahui	afectaciones en la vía
DESCRIPCIÓN	Identificación para enumerar los eventos	Fecha registrada en los periódicos en sus versiones digitales	Característica principal de la precipitación	Tipo de fenómeno hidromorfológico	Causa mencionada por el escritor del periódico	Ubicación cantonal	Sector o manzana	Calle, avenida, referencia	Breve descripción de las afectaciones

Nota. Tomado de (Ron, 2022).

Tabla 2. Lista de estaciones meteorológicas seleccionadas según formato WGS 84/Zona 17S.

ESTACIONES METEOROLOGICAS						
CÓDIGO	NOMBRE	PROPIETARIO	ESTADO	TIPO	COORDENADAS	
					X	Y
M0024	IÑAQUITO	INAMHI	OPERATIVA	METEOROLOGICA	779893	9981193
M0002	LA TOLA	INAMHI	OPERATIVA	METEOROLOGICA	792709	9974351
M0003	IZOBAMBA	INAMHI	OPERATIVA	METEOROLOGICA	772463	9959068
M0114	TUMBACO	REMMAQ	OPERATIVA	METEOROLOGICA	787627	9973816
M5037	BELISARIO	REMMAQ	OPERATIVA	METEOROLOGICA	779460	9980333
M5036	CARAPUNGO	REMMAQ	OPERATIVA	METEOROLOGICA	780822	9989429
M5041	LOS CHILLOS	REMMAQ	OPERATIVA	METEOROLOGICA	782954	9966441
M5035	COTOCOLLAO	REMMAQ	OPERATIVA	METEOROLOGICA	778625	9988876
M5038	EL CAMAL	REMMAQ	OPERATIVA	METEOROLOGICA	777385	9971974
M5039	GUAMANI	REMMAQ	OPERATIVA	METEOROLOGICA	772371	9963677

Nota. Tomado de (Ron, 2022).

Validación de datos

La base de datos sobre los impactos de fenómenos hidromorfológicos fue verificada siguiendo estos criterios:

- Los reportes periodísticos de la página web oficial del medio de comunicación;
- El evento y la zona afectada deben estar situados dentro del área de estudio;
- Cada suceso debe contar con al menos dos fuentes periodísticas que lo respalden.

La georreferenciación de los eventos se llevó a cabo mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG), utilizando el software QGIS (Figura 6).

Mapas de densidad (Densidad de Kernel)

Estos mapas se llevaron a cabo con la ayuda de la utilización del software QGIS, para lo cual se utilizó la herramienta Heatmaps, se realizó los mapas de calor con valores de radio de 50, 100, 150 y 200 metros, donde, el radio que mejor se ajustó para el estudio es de 100 metros (Ron, 2022). Con base en estos mapas, se identificaron las zonas con mayor concentración de afectaciones para cada tipo de fenómeno hidromorfológico, determinando así los focos principales de impacto. (Tabla 3).

Tabla 3. Densidad de Kernel según su clasificación.

COLOR	DENSIDAD DE KERNEL
	Máxima
	Alta
	Media
	Baja
	Mínima

Cálculo de precipitación media

Método de Isoyetas

Este enfoque se considera el más preciso para estimar la precipitación media (P_m) en una determinada región. Consiste en trazar curvas que representen valores iguales de precipitación a lo largo de un conjunto de años, utilizando un proceso de interpolación de puntos (Ron, 2022). Tras completar la interpolación, la precipitación media se determina aplicando la siguiente ecuación (1):

$$P_m = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \cdot P_i}{\sum A_i} \quad (1)$$

Donde:

P_m : Precipitación media;

A_i : Área neta de isoyetas;

P_i : Precipitación media entre isoyetas.

Cálculo de intensidad media

Se refiere al volumen de precipitación que se registra en un punto determinado durante un periodo específico, es decir, la cantidad de agua caída (mm) a lo largo de la duración del evento de lluvia (Ron, 2022). Para determinar la intensidad, se utilizó la siguiente ecuación (2):

$$i = P/t \quad (2)$$

Donde:

i = Intensidad (mm/h)

P = Precipitación (mm)

t = Duración del evento (horas)

Intensidad media

Es el promedio de intensidad en cierto tiempo determinado, se calculó la I media mensual y la I media anual (Ron, 2022). Se calcula mediante la siguiente fórmula (3):

$$I_m = (I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n) / n \quad (3)$$

Donde:

I_m : Intensidad media (mm)

I_1, I_2, I_n : Intensidad de las estaciones meteorológicas (mm)

n : Número de estaciones.

Cálculo de Evapotranspiración

La evapotranspiración es el resultado de la combinación de dos procesos: la evaporación y la transpiración (Ron, 2022). Este parámetro se determina mediante la ecuación de Thornthwaite (1948), siguiendo los siguientes pasos:

En primer lugar, se calcula el índice de calor mensual (i) utilizando la temperatura media mensual (t), según la ecuación 4 (Ron, 2022).

$$i=(t/5)^{1.514} \quad (4)$$

Segundo, según fórmula 5 se calcula el índice de calor anual (I) sumando los 12 meses de i :

$$I=\sum i \quad (5)$$

Tercero, según formula la 6, e calcula la ETP mensual “sin corregir”:

$$ETP_{sin\ corregir}=16((10.t)/I)^a \quad (6)$$

Donde:

$$a: 675x10^{(-9)} I^3-771x10^{(-7)} I^2+1792x10^{(-5)} I+0.49239$$

Por último, corrección para el n° de días del mes y n° de horas de sol, ver formula 7

$$ETP=ETP_{sin\ corregir} \times N/12 \times d/30 \quad (7)$$

Donde:

N: Número máximo de horas del sol, dependiendo del mes y la tabla de la latitud, en este caso la zona de estudio está en el hemisferio sur y es de 12.1 para todos los meses.

d: Número de días del mes.

Balance Hídrico

Según la metodología de Thornthwaite, el balance hídrico se construye tomando en cuenta los ingresos de agua (precipitación), y las salidas (evapotranspiración potencial ETP), a través de un cálculo que establece la capacidad máxima de almacenamiento de agua en el suelo. En este estudio, se determinó el excedente de agua como la diferencia entre la ETR y la precipitación. Se aplicó un método directo, en el cual se asume que el 50 % del excedente se infiltra y el otro 50 % escurre, sin considerar otros factores que puedan influir en estos procesos (Ron, 2022).

Umbral de precipitación

Se realizaron análisis que examinaron la variabilidad de estos umbrales durante los años 2017, 2018 y 2019, así como su correspondencia con las zonas de influencia de las estaciones meteorológicas ubicadas en las áreas más impactadas. La determinación de umbrales para movimientos en masa se basó en la metodología de “indicadores de precipitación” propuesta por Canales (2011), originalmente diseñada para Tegucigalpa. Esta técnica fue ajustada mediante la incorporación del balance hidrológico, empleando la precipitación filtrada para optimizar la precisión en la estimación del potencial de generación de deslizamientos en el Distrito Metropolitano de Quito.

Umbrales de precipitación inundaciones

Se tomó como referencia la identificación de los valores diarios de precipitación que excedieron

en un 10 % la cantidad registrada durante los eventos en los que ocurrieron estos fenómenos.

Umbrales de precipitación movimientos en masa

Indicadores de precipitación

Estos umbrales pueden determinarse mediante enfoques empíricos o físicos. En el método empírico, su estimación se basa en la relación con la precipitación, mientras que, en el enfoque físico, el cálculo integra factores como la geomorfología, geología, presión de poros, hidráulica, intervención humana y precipitación, utilizando modelos numéricos para su análisis (Ron, 2022). En este estudio, el umbral de precipitación fue determinado mediante un enfoque empírico, basado en la correlación entre los registros de lluvia y los eventos generados por su impacto. El cálculo se realizó considerando los parámetros de precipitación acumulada en días previos (P_1, P_3, \dots, P_n) y la precipitación registrada el día del evento (Pradenas, 2014). El indicador se calcula mediante la sumatoria de precipitación de días anteriores incluido el día del evento, se utiliza la siguiente ecuación (8) (Canales, 2011):

$$P(n) = \sum_{i=1}^n P_i \quad (8)$$

Donde:

$P(n)$: indicador de lluvia antecedente ($P_1, P_3, P_{10}, P_{15}, P_{20}, P_{25}, P_{30}$)

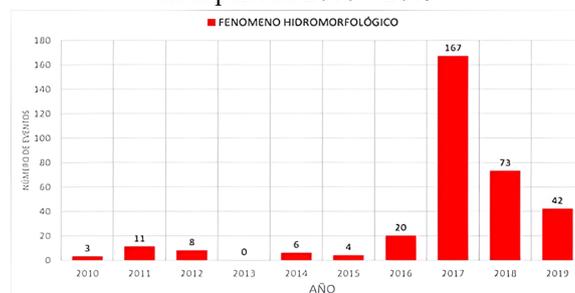
n : número de días de lluvias antecedentes (1, 3, 10, 15, 20, 25, 30)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Eventos ocasionados por fenómenos hidromorfológicos 2010-2019

Entre 2010 y 2019 se registraron un total de 332 eventos asociados a fenómenos hidromorfológicos. El análisis reveló un promedio anual de 33 eventos, aunque 2017 destacó como el año con mayor impacto, con un total de 167 eventos. Asimismo, 2018 y 2019 fueron años significativos, con 73 y 42 eventos respectivamente. No obstante, el período 2010-2016 presentó una menor cantidad de eventos, e incluso en 2013 no se reportó ninguna afectación de este tipo (Figura 7). Se observa un incremento gradual entre 2010 y 2016, seguido de un aumento abrupto del 200% en 2017, tras el cual la cifra disminuyó en un 100% en los años 2018 y 2019 (Ron, 2022).

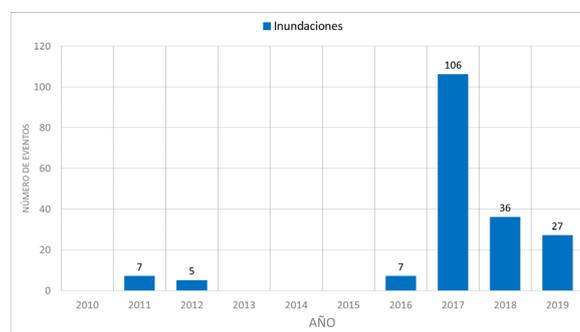
Figura 7. Eventos producidos por fenómenos hidromorfológicos en el periodo 2010 – 2019.



Los años con mayor impacto por inundaciones fueron 2017, 2018 y 2019. En 2017 se registraron aproximadamente 106 eventos, siendo este el año con la mayor afectación por este tipo de fenómeno. En 2018, la cifra se redujo a 36 eventos, y en 2019 disminuyó aún más a 27. Por otro

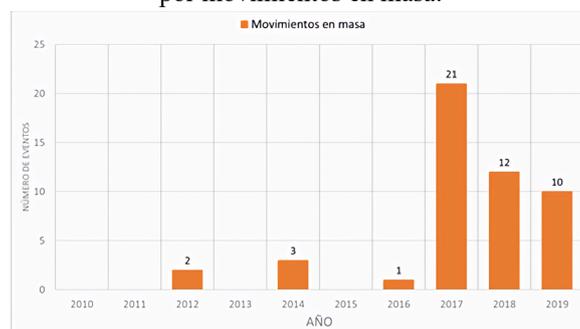
lado, antes de 2017, el promedio anual de eventos fue de aproximadamente 5, con algunos años sin registros de inundaciones, como 2010, 2014 y 2015 (Figura 8) (Ron, 2022).

Figura 8. Eventos producidos por inundaciones.



Los movimientos en masa impactaron la urbe en los mismos años, registrando al 2017 como el año con mayor número de eventos, alcanzando un total de 21. Entre 2018 y 2019, el promedio anual fue de aproximadamente 11 eventos. Asimismo, en 2012, 2014 y 2016 también se presentaron este tipo de fenómenos, con un promedio de 2 eventos por año (Figura 9) (Ron, 2022).

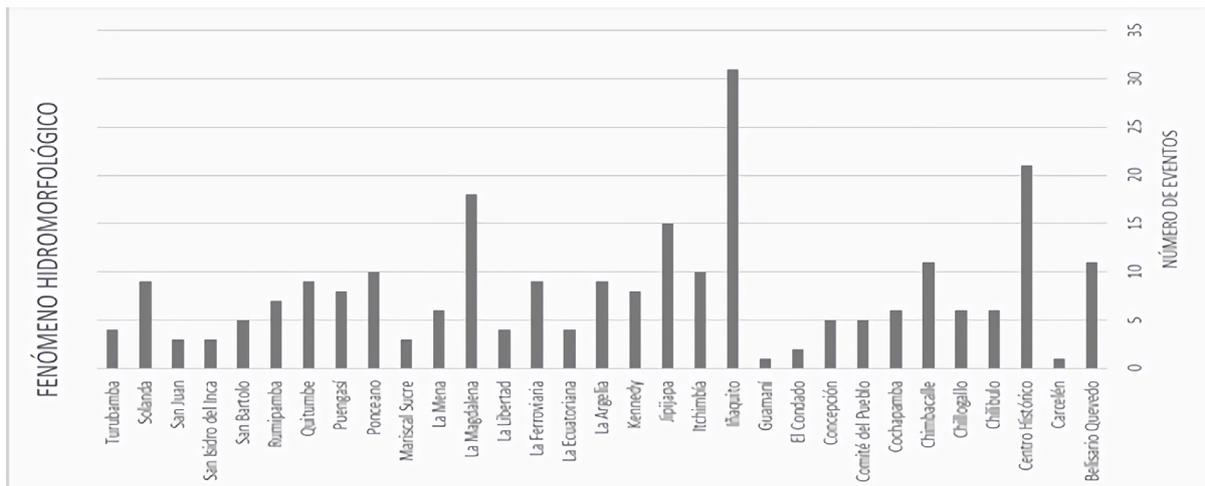
Figura 9. Eventos por movimientos en masa



Sector afectado

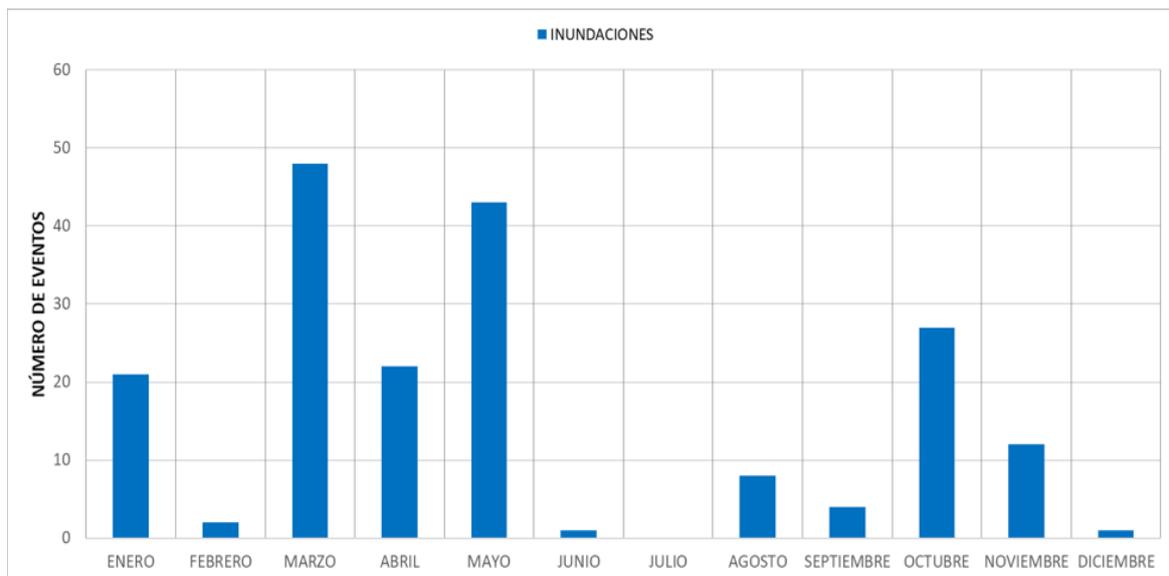
En el año 2017, los sectores más afectados por fenómenos hidromorfológicos fueron Iñaquito y La Magdalena, mientras que Belisario Quevedo, Chimbacalle, Jipijapa, Kennedy, La Argelia y La Mena registraron un menor número de eventos. Para el 2018, los sectores con mayor impacto fueron el Centro Histórico, Itchimbía, Ponceano, Puengasí y Quitumbe. Mientras que, en el año 2019, las zonas afectadas fueron Solanda, La Ferroviaria y el Centro Histórico (Figura 10). En cuanto a las inundaciones, 2017, el año con mayor cantidad de eventos de este tipo, presentó incidencias principalmente en enero, marzo, mayo y octubre. En 2018, los eventos se concentraron en marzo, abril y noviembre, a diferencia del 2019 ocurrieron en marzo y abril. Cabe destacar que las inundaciones de octubre solo se registraron en 2017, al igual que las de noviembre, que fueron exclusivas de 2018 (Ron, 2022).

Figura 10. Sectores afectados por algunos fenómenos hidromorfológicos



En general, durante el período 2010-2019, las inundaciones se registraron con mayor frecuencia en los meses de enero, marzo, abril, mayo, octubre y noviembre. Por el contrario, los meses de febrero, junio, julio y diciembre presentaron una menor incidencia de estos fenómenos, siendo julio el único mes sin eventos registrados (Figura 11) (Ron, 2022).

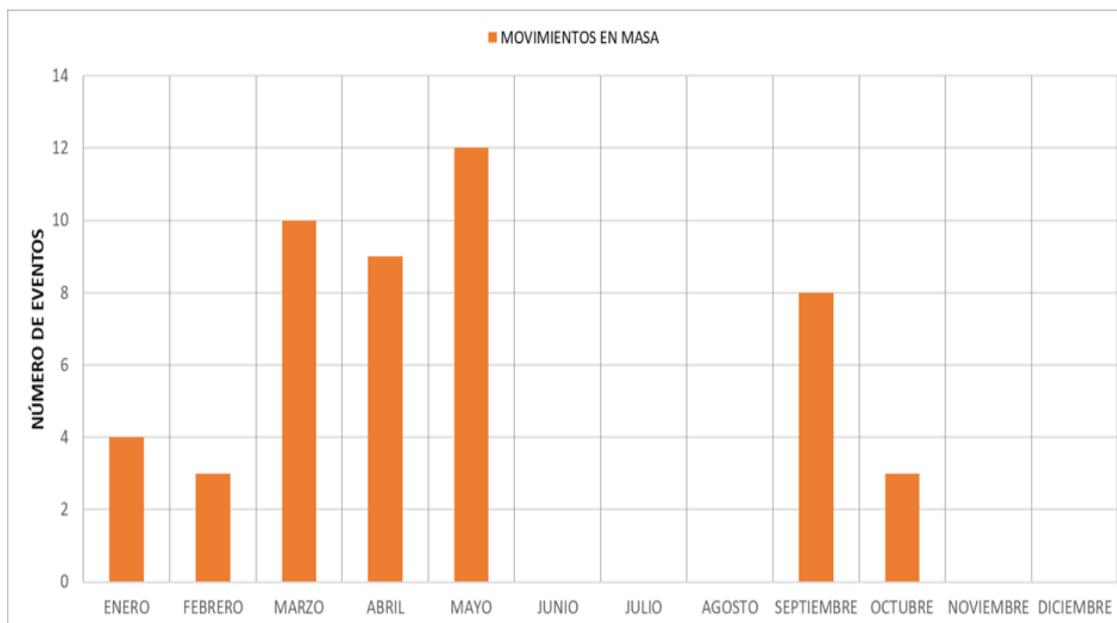
Figura 11. Inundaciones según promedio mensual 2010-2019



Los movimientos en masa en 2017 ocurrieron principalmente en los meses de enero, marzo y mayo. En 2018, estos eventos se registraron en febrero, abril y septiembre, mientras que en el 2019 se presentaron en febrero, marzo y abril. Cabe destacar que los movimientos en masa ocurridos en octubre de 2017 y en septiembre de 2018 fueron exclusivos de esos meses (Ron, 2022).

De manera general, estos fenómenos se concentran en los meses de marzo, abril, mayo, septiembre y octubre, mientras que su ocurrencia es menor en enero, febrero y octubre (Figura 12).

Figura 12. Movimientos en masa promedio mensual por 2010-2019



Mapas de densidad

Las inundaciones presentan las mayores densidades en el norte, particularmente en los sectores de Jipijapa, Ñaquito y Mariscal Sucre. En la zona central, los sectores más afectados son el Centro Histórico, La Libertad, La Magdalena y Chimbacalle, mientras que en el sur destaca Solanda (Ron, 2022). Además, alrededor de estas zonas focales de inundación se extienden áreas con alta densidad de eventos, debido a la amplia cobertura que alcanzan estos fenómenos cuando ocurren (Figura 13).

Los movimientos en masa ocurren de manera puntual, lo que genera una distribución heterogénea de sus densidades. No obstante, se identifican tres zonas con alta concentración de eventos: Chilibulo y La Mena, ubicadas en la zona de laderas, y La Argelia, en el sur (Ron, 2022).

Es importante destacar que, dado el alto impacto socioeconómico de estos fenómenos, incluso un solo evento registrado en un período de 10 años es clave para la determinación de zonas focales (Figura 14). Se ha identificado la presencia de sectores con alta densidad de movimientos en masa, entre ellos Cochapamba, Belisario Quevedo, La Libertad y La Ecuatoriana, todos situados en las laderas del CVP, siendo La Ecuatoriana afectada por la influencia del Atacazo. Asimismo, se han detectado áreas con alta densidad en las elevaciones morfológicas del sistema de fallas de Quito, incluyendo Puengasí, Conocoto, Turubamba, Mariscal Sucre, Jipijapa y Comité del Pueblo (Figura 14) (Ron, 2022).

Figura 13. Mapa de calor por eventos de inundaciones 2010-2019

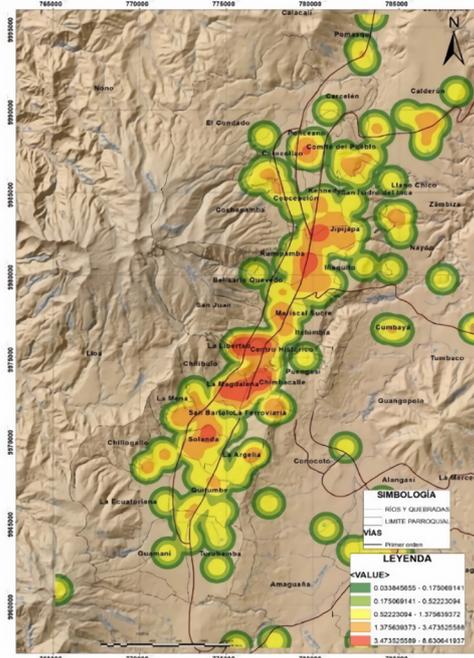
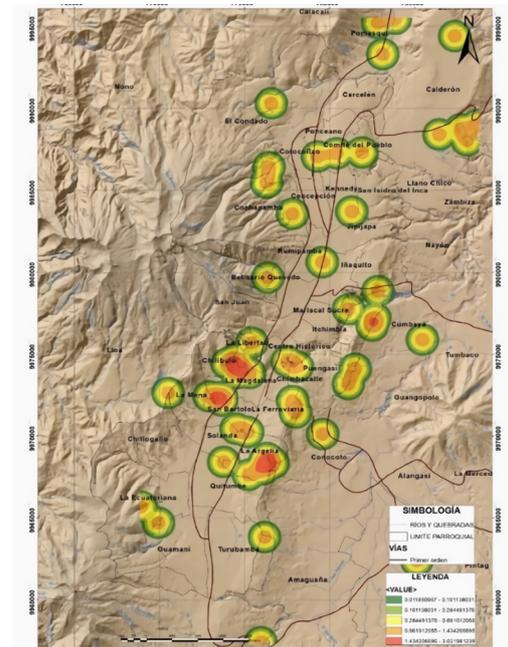


Figura 14. Mapa de calor por eventos de movimientos en masa 2010-2019

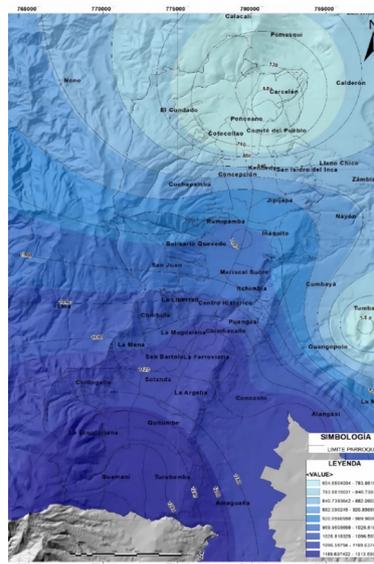


Precipitación media anual

La Figura 15 muestra que la precipitación en la zona de estudio presenta una tendencia de crecimiento de norte a sur. Las precipitaciones medias anuales más altas son:

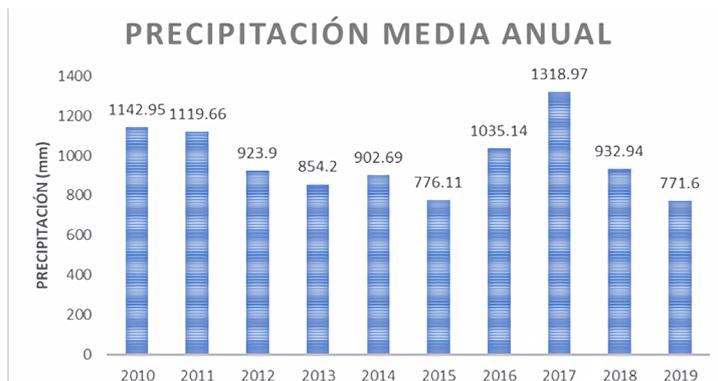
- i. En la zona norte de la urbe, con 654.66 mm;
- ii. En el centro, con 969.96 mm;
- iii. Y en el sur, alcanzando los 1096.59 mm (Ron, 2022).

Figura 15. Mapa de Isoyetas y Precipitación media anual 2010-2019



La curva de la precipitación media anual muestra una tendencia de decrecimiento constante entre 2010 y 2015. Posterior a ello, se observa un aumento abrupto en 2017, seguido de una disminución nuevamente en 2019. El pico más alto de precipitación media anual se registró en 2017 con 1318.97 mm, mientras que los valores más bajos ocurrieron en 2015 con 776.11 mm y en 2019 con 771.6 mm (Figura 16) (Ron, 2022).

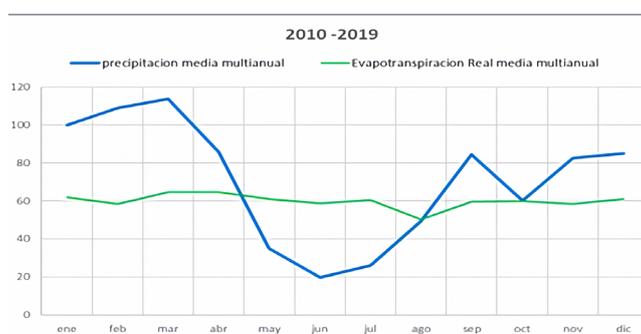
Figura 16. Datos de precipitación media anual 2010-2019



Evapotranspiración Real (ETR)

La ETR mensual promedio entre 2010 y 2019 se ha mantenido constante, alrededor de 60 mm por mes. Sin embargo, al compararla con la precipitación media, se observa que la ETR supera la precipitación en los meses de mayo, junio, julio y agosto. Durante estos meses, los procesos de filtración, escurrimiento y acumulación no ocurrirán, ya que la lluvia se evaporará debido a las altas temperaturas. En cambio, en los meses de enero, febrero, marzo y abril, donde la ETR es menor que la precipitación media, habrá un exceso de agua, lo que permitirá que los procesos hidrológicos mencionados tengan lugar. Por otro lado, en los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre, cuando la ETR y la precipitación son similares o la precipitación no supera significativamente la ETR, se producirá una compensación, lo que impedirá que se desarrollen los procesos hidrológicos posteriores a la evapotranspiración (Figura 17) (Ron, 2022).

Figura 17. Datos del promedio del balance hídrico 2010-2019



Exceso (Precipitación neta)

Durante los meses de marzo y abril entre 2010 y 2019, se presenta un alto exceso de agua que

se filtrará y escurrirá, lo que resulta en una mayor cantidad de agua infiltrada en el suelo y el subsuelo. Como consecuencia, en mayo el suelo estará total o parcialmente saturado de agua, incluso si no se registran lluvias en este mes (Figura 18) (Ron, 2022).

Figura 18. Datos de exceso de precipitación media 2010-2019

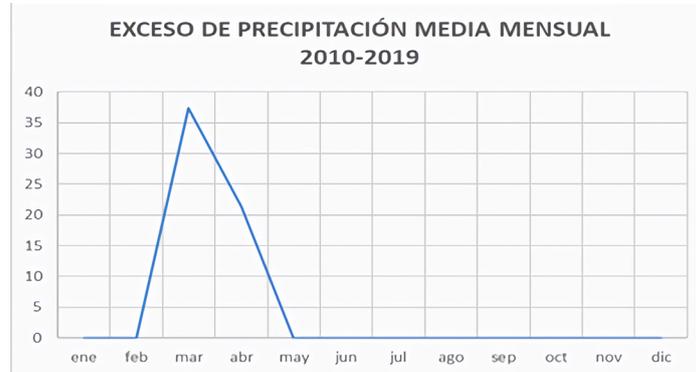


Figura 19. Intensidad media anual 2011

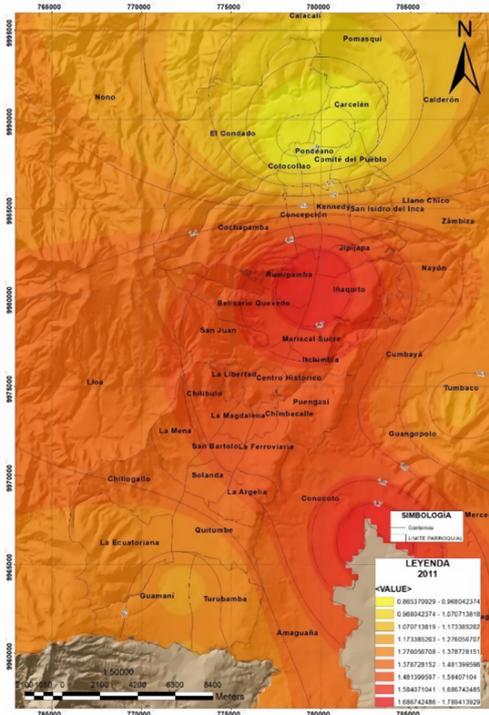


Figura 20. Intensidad media anual 2014

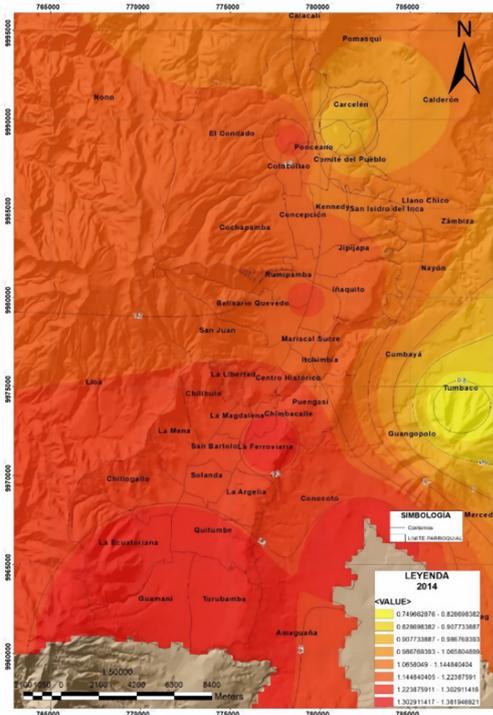


Figura 21. Intensidad media anual 2017

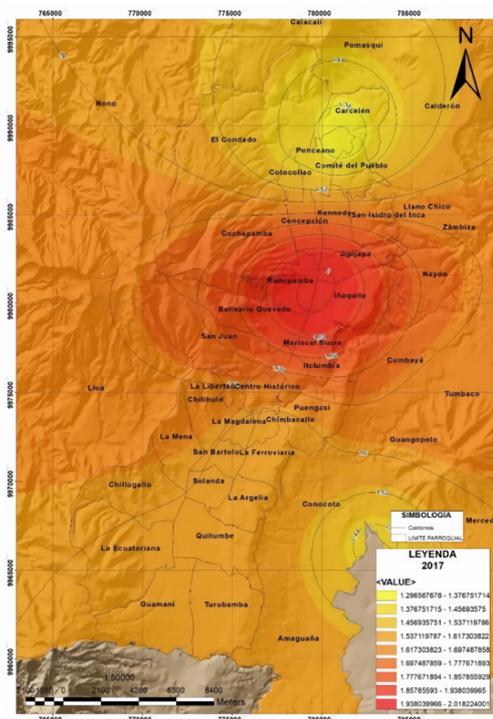
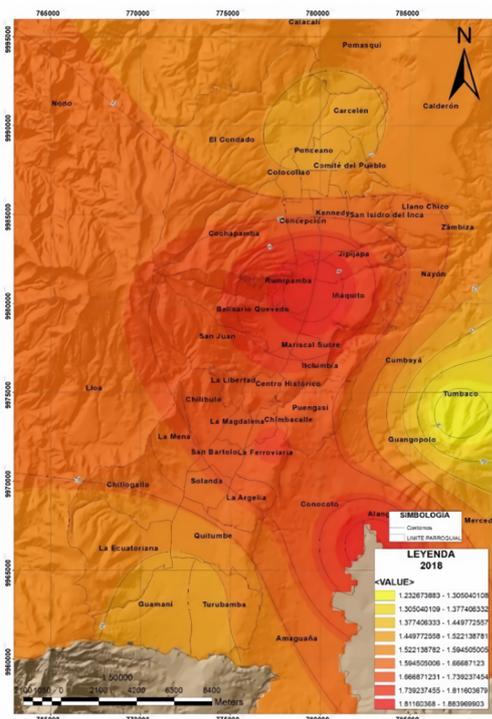


Figura 22. Intensidad media anual 2018



Intensidad

En el año 2011, la mayor intensidad media de precipitación se registró en la zona de Iñaquito, con valores de 1.66-1.78 mm/h. A medida que nos desplazamos hacia el sur, desde Mariscal Sucre, los valores disminuyeron de 1.66 mm/h a 1.27 mm/h. Al norte, desde Jipijapa hasta Carcelén, la intensidad descendió de 1.66 mm/h a 0.8 mm/h (Figura 19). En el 2014, la distribución de la intensidad cambió notablemente. La mayor intensidad se observó en la zona sur, especialmente en Guamaní, con valores de 1.3-1.38 mm/h, y disminuyó hacia el norte, alcanzando 0.9 mm/h (Figura 20). Para el año 2017, la intensidad se concentró nuevamente en Iñaquito, con valores de 1.9 mm/h, y descendió de manera radial hacia el sur y el norte de la zona, alcanzando valores de 1.45 mm/h (Figura 21). Finalmente, en el año 2018, la intensidad aumentó en los sectores del Centro Histórico y La Ferroviaria, con valores que variaron entre 1.7 y 1.88 mm/h. Al norte de La Concepción, la intensidad disminuyó hasta 1.55 mm/h, mientras que al sur de Quitumbe bajó a 1.5 mm/h (Figura 22) (Ron, 2022).

Discusión

La metodología empleada en este estudio para determinar los umbrales de precipitación asociados a los movimientos de masa se basa en el método de Carrera Villacrés et al. (2016). A esta metodología se le incorporó el entorno hidrológico de las precipitaciones, un factor que no fue considerado por los autores mencionados, ya que el agua acumulada en el suelo y el subsuelo no corresponde a la precipitación total, sino solo al 50% que se filtra del exceso de agua resultante de la ETR. El aumento de la precipitación en los años 2017, 2018 y 2019

generó un exceso de agua mayor, lo que permitió una mayor filtración de agua en el suelo y el subsuelo. Esto a su vez provocó un incremento de los movimientos en masa en los sectores de Atucucho, San Isidro del Inca, Ñaquito, La Argelia, Chilibulo y La Ferroviaria. El Centro Histórico también sufre inundaciones, pero su morfología particular, formada por una especie de cubeta rodeada de lomas, facilita la acumulación de agua (Ron, 2022).

4. CONCLUSIONES

Se registraron un total de 188 inundaciones, afectando principalmente a los sectores del Centro Histórico, Ñaquito, La Magdalena, Solanda, Jipijapa, Belisario Quevedo, Kennedy y Quitumbe. Además, se reportaron 49 movimientos en masa, de los cuales 37 fueron deslizamientos, 4 caídas de roca y 10 flujos de lodo, con mayor incidencia en Atucucho, San Isidro del Inca, Ñaquito, La Argelia, Chilibulo y La Ferroviaria.

Los umbrales de precipitación necesarios para que ocurran inundaciones varían según la zona. En Ñaquito, Jipijapa y Kennedy, se requieren 23.25 mm con intensidades entre 0.9 y 2 mm/h; en el Centro Histórico, el umbral es de 0.3 mm con intensidades de 1.3 a 1.7 mm/h; mientras que, en La Magdalena y Solanda, es de 0.3 mm con intensidades de 0.9 a 2 mm/h. Por otro lado, los movimientos en masa dependen tanto de la acumulación de agua en el suelo y subsuelo como de la cantidad e intensidad de las precipitaciones diarias. Para La Argelia, Chilibulo, Puengasí, La Ferroviaria, La Libertad y La Mena, el umbral de precipitación detonante es superior a 4 mm con intensidades entre 0.8 y 1.6 mm/h, acumulando más de 68.79 mm. En sectores como Cochapamba, Kennedy, San Isidro del Inca e Ñaquito, la precipitación debe superar los 10 mm con intensidades de 0.8 a 1.6 mm/h, acumulando más de 99.05 mm de agua.

El incremento de afectaciones en la zona urbana del DMQ puede atribuirse al aumento de la precipitación, que genera un mayor excedente de agua, incrementando la infiltración en el suelo y subsuelo, lo que a su vez favorece la ocurrencia de movimientos en masa. En el caso de las inundaciones, el exceso de agua supera la capacidad de los colectores de alcantarillado, siendo la intensidad de la lluvia un factor determinante. Además, la actividad antrópica modifica las condiciones geomorfológicas de las zonas afectadas, mientras que los asentamientos irregulares en áreas vulnerables agravan el problema. Si no se implementan medidas de manejo y control, en el futuro surgirán nuevas zonas de riesgo y un aumento en las afectaciones por fenómenos hidromorfológicos. Asimismo, la falta de mantenimiento y las deficiencias en el diseño y construcción de los sistemas de alcantarillado contribuyen al incremento de inundaciones en la ciudad.

REFERENCIAS

- Canales, C. (2011). Cálculo de umbrales para la ciudad de Tegucigalpa, Universidad Nacional Autónoma de Honduras Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra, Convenio SERNA/ UNAH ELABORADO.
- Estacio, J., & Rodriguez, G. (2012). The morpho-climatic events in metropolitan of MDQ: a social and recurring construction [Los eventos morfoclimáticos en el metropolitano del DMQ: una construcción social y recurrente.]. In David Cáceres Bayona, E. M. Esguerra,

- H. L. Otaya, & M. E. Manrique (Eds.), LETRAS VERDES (pp. 774–100).
- Gallardo, P. (2017). Caracterización hidrogeológica y dinámica de los acuíferos de Quito en las estaciones y el viaducto en la primera línea del metro, Universidad Central del Ecuador, Carrera de Geología, Quito.
- INAMHI. (2015). Determinación de ecuaciones para el cálculo de intensidades máximas de precipitación. Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, 2, 282. http://www.serviciometeorologico.gob.ec/Publicaciones/Hidrologia/Estudio_de_intensidades_v_final.pdf
- MDMQ. (2012). Plan metropolitano de ordenamiento territorial 2012-2022. Quito.
- MDMQ. (2015). Atlas de amenazas naturales y exposición de infraestructura del Distrito Metropolitano de Quito. In EXCO-Excelencia Corporativa. Quito. https://ia801301.us.archive.org/31/items/AtlasAmenazasNaturalesDMQ/Atlas_amenazas_naturales_DMQ.pdf
- Peltre, P. (1989). Quebradas y Riesgos Naturales en Quito, Periodo 1900-1988. In Riesgos Naturales en Quito Lahares, aluviones y derrumbes del Pichincha y del Cotopaxi. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers11-10/31647.pdf
- Pradenas, M. (2014). Umbral empírico de deslizamiento por precipitación, para la provincia de Concepción. [Universidad del Bío Bío]. <http://repositorio.uancv.edu.pe/bitstream/handle/UANCV/439/TESIS.pdf?cv=1&isAllowed=y&sequence=1>
- Ron, C. E. (2022). *Afectaciones de la zona urbana del Distrito Metropolitano de Quito por precipitaciones en el periodo 2010-2019*. (Tesis de grado, Universidad Central del Ecuador). Repositorio institucional UCE. <https://www.dspace.uce.edu.ec/entities/publication/bb721841-23cb-458e-96cf-1fc3697575d1>
- Sasso, J., Andrade, M., Ospina, O., Araujo, P., Albornoz, P., Washima, P., Crespo, R., Álvarez, Y., T., P. O., & Narváez, I. (2011). Perspectivas del ambiente y cambio climático en el medio urbano: ECCO Distrito Metropolitano de Quito, Quito.
- Toscano, E. (2018). Asentamientos en el sector de Solanda fase diagnóstico informe hidrogeológico. Código Buenas Prácticas En El Sector Construcción, July, 18–19.
- Villacis Rivadeneira, E., y Marrero de León, N. (2017). Precipitaciones extremas en la ciudad de Quito, provincia de Pichincha- Ecuador. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 38(2), 102–113.
- Zevallos M., O. (2001). Ocupación de laderas e incremento del riesgo de desastres en el Distrito Metropolitano de Quito. *Memorias del Seminario Gestión de Riesgos y Prevención de Desastres Quito*, 106–117.