

Aplicación de la geoquímica de isótopos ambientales (^{18}O y ^2H) en los análisis de estabilidad hidrogeomorfológica de laderas y taludes: estudio de caso.

Application of the geochemistry of environmental isotopes (^{18}O y ^2H) in the analysis of hydrogeomorphological stability of hillside and slopes: case study.

Guerrero, Omar Antonio^{1*}; Benavides-Rojas, Mario²; Toro-Mora, Rosibeth³; Uzcátegui-Salazar, Marisela³; Jégat, Hervé⁴

¹Escuela de Geociencias – Universidad Técnica Particular de Loja - Ecuador

²Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias – Ecuador. Zona 7.

³Grupo de Investigación TERRA. Escuela de Ingeniería Geológica - Universidad de los Andes- Venezuela.

⁴Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial - Universidad de los Andes - Venezuela.

*oaguerrero37@utpl.edu.ec

Resumen

La geoquímica de isótopos se realiza para determinar calidad y cantidad de isótopos naturales de agua oxígeno ($\delta^{18}\text{O}$) y deuterio ($\delta^2\text{H}$) y como trazadores naturales de los flujos de agua superficial y subterráneos en un sistema hidrogeológico, con el propósito de establecer la correspondencia geoquímica del agua de las zonas fuentes y manantiales. La toma de muestras requiere de un protocolo estricto para evitar contaminación y el procesamiento se realiza utilizando el equipo analizador de concentración de gases e isótopos L2130 –i o equivalentes. Los resultados obtenidos son integrados a la geología de campo, geofísica (SEV – tomografías eléctricas) y la geomecánica de suelos obtenidas a través de perforaciones. Con esta correlación, se pueden identificar la relación causa-efecto de procesos hidrometeorológicos y aplicar lo correctivos ingenieriles de mitigación de riesgos. Este procedimiento fue aplicado en la Ciudadela “Ciudad Victoria”, Loja – Ecuador (6966314N / 9557335E, 2200msnm), construida entre los años 2006-2007, donde se producen deslizamientos de masa lentos y múltiples en las zonas de laderas que tiene detonante hidrometeorológico de origen natural y antropogénico, que afectan el suelo urbano de ésta, perjudicando decenas de viviendas y sus sistemas (empotrados, subterráneos, tuberías) de aguas servidas, potable y alcantarillado pluvial. Las hipótesis que surgen para que se produzcan los deslizamientos tienen causas variadas, por lo que se requiere evaluar geoquímicamente las aguas fuentes y manantiales para determinar el origen de dicho problema de inestabilidad geotécnico de ladera y del suelo urbano y proponer alternativas para su mitigación. Los resultados determinaron dos localizaciones de ingreso de agua que producen desbalance hídrico en el subsuelo, con ascenso del nivel freático entre 0 y 2m, saturación de suelo y fuertes daños a viviendas e infraestructura de servicios. Finalmente, se localizan los sitios óptimos para establecer el diseño y construcción de las obras hidráulicas.

Palabras clave: Isótopos naturales, hidrometeorología, riesgos socionaturales, mitigación.

Abstract

Isotope geochemistry is performed to determine the quality and quantity of natural water isotopes oxygen $\delta^{18}\text{O}$ and deuterium ($\delta^2\text{H}$) and as natural tracers of surface and groundwater flows in a hydrogeological system, with the purpose of establishing the geochemical correspondence of water between sources (entry) and fountains (exit) areas. Sampling requires a strict protocol to avoid contamination and processing is performed using the L2130-i gas and isotope concentration analyzer equipment or equivalent. The results obtained are integrated to field geology, geophysics (SEV – electrical tomography) and soil geomechanics obtained through drilling. With this correlation, the cause-effect relationship of hydrogeomorphological processes can be identified and engineering correctives for risk mitigation can be applied. This procedure was applied in the "Ciudad Victoria", Loja - Ecuador (6966314N/9557335E, 2200msnm), built between 2006-2007, where slow and multiple mass slides occur in the hillside areas that have triggers. hydrometeorological of natural and anthropogenic origin, which affect its urban land, damaging dozens of homes and their systems (built-in, underground, pipes) of sewage,

drinking water and storm sewage. The hypotheses that arise for the occurrence of landslides have varied causes, so it is necessary to geochemically evaluate the water sources and springs to determine the origin of said problem of geotechnical instability of the slope and urban land and propose alternatives for its mitigation. The results determined two locations of water ingress that produce water imbalance in the subsoil, with a rise in the water table between 0 and 2m, soil saturation and severe damage to homes and service infrastructure. Finally, the optimal sites are located to establish the design and construction of the hydraulic works.

Keywords: *natural isotopes, hydrogeomorphology, socio-natural risks, mitigation.*

1 Introducción

Los movimientos de masa en laderas y taludes constituyen una amenaza y riesgo constante, en zonas de montaña y piedemonte, para la planificación territorial de zonas de crecimiento urbano. Las causas de los mismos son múltiples y pueden ser desencadenadas por detonantes de tipo hidrometeorológico o sísmicorelacionado con movimiento telúrico, integrados a parámetros condicionantes como las pendientes críticas, litología (tipo y estado de la roca), provocan inestabilidad geotécnica de los terrenos y por ende, inutilidad o incrementos de los costos de construcción de terrenos potencialmente urbanizables, desmejorando en muchos casos la calidad de vida de la población con eventuales pérdidas humanas y materiales.

La aplicación de métodos geológicos integrados geoquímicos y geofísicos no invasivos () en la solución de problemas de estabilidad geotécnica e hidrogeomorfológicos en taludes y laderas han tenido escasa aplicación (Guerrero y col. 2018), existen estudios aislados de geoquímica de isótopos de agua realizados en la cuenca hidrográfica del río Zhurucay, provincia de Cuenca – Ecuador (Lazo y col., 2013) y en el sistema hidrológico de Laguna Tsicapa, Nicaragua (Barberena y col., 2020), en estudio paleoclimatológicos (Martín y col., 2015), en aplicaciones de flujos de energía en zonas costera de Uruguay (Bergamino y col., 2017) y en experiencias realizadas en el campo de la hidrogeología y contaminación de acuíferos (Nakamura 1989; Annan 1992; SESAME 2004; Wendaland y col., 2013). Además, esta la herramienta de geoquímica de isótopos es aplicada con éxito en la prospección y evaluación de hidrocarburos (Valencia y col., 2014). La aplicación de estos métodos integrados en estabilidad de taludes y laderas para mitigación de riesgos geológicos y zonificación geotécnica en estudios locales en Venezuela (Guerrero y col., 2018; Guerrero-Camargo y col., 2018) y, en la medida que avanza la tecnología para estudios del subsuelo, se fortalecen estos métodos en los planes de microzonificación sísmica y riesgos geológicos en zonas urbanas y potencialmente urbanizables (ONU - PNUD, 2017).

A nivel local en la provincia de Loja, se han realizado caracterizaciones de movimientos de masa aplicando métodos de tomografía eléctrica bajos sus configuraciones básicas Werner-Schlumberger, definiendo zonas saturadas y niveles freáticos para la identificación de

detonantes de movimientos de masa en laderas (Morocho 2014). Así mismo, Tamay (2015) aplicó métodos gravimétricos a lo largo de la cuenca sedimentaria de Loja, Malacatos – Vilcabamba y Catamayo para evaluar espesores de los rellenos sedimentarios y su vinculación con los eventos tectónicos. Aplicaciones geofísicas con fines de movimientos de masa fueron realizadas en la ciudad de Loja - Ecuador (Gómez 2017) y en Zaruma (Ramón 2018). Estas investigaciones, así como las evaluaciones geológicas realizadas por Kennerley (1973); Kennerley y col. (1975); Litherland y col. (1984) y Hungerbühler y col. (2001), entre otros, que servirán de base para orientar el trabajo de campo geológico y geomorfológico a nivel local y aplicar la evaluación geológica integral y geoquímica de isótopos naturales de agua con el propósito de evaluación de estabilidad de laderas y taludes en la localidad de estudio.

La exploración geológica e hidrogeomorfológica del área urbana y potencialmente urbanizable de la ciudadela “Ciudad Victoria”, se realiza haciendo énfasis en la evaluación geológica de superficie, geofísica (a través de la aplicación de las técnicas de sondeos eléctricos verticales y tomografías eléctricas), para determinar el tipo de material geológico (suelo y roca), y su integración al análisis de geoquímica de isótopos naturales de agua ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$), debido a la presencia de laderas y taludes con evidente morfologías de terreno sometidos a movimientos de masa lentos (reptación – solifluxión) y posible zonas de deslizamientos de masa tipo rotacionales o traslacionales, los cuales tienen su origen en procesos de naturaleza hidrometeorológica, por tal motivo se plantea evaluar los mecanismos de transmisión de flujos subterráneos y subsuperficiales que generan estos los movimientos de masa y, localizar de manera más precisa los sitios óptimos de correctivos ingenieriles y de esta manera mitigar el riesgo geológico.

2. Localidad del estudio

En la Ciudadela “Ciudad Victoria”, construida entre los años 2006-2007, se producen deslizamientos lentos múltiples en las zonas de laderas que tiene detonante hidrometeorológico de origen natural y antropogénico, los cuales afectan directa e indirectamente al suelo urbano de la ciudadela “Ciudad Victoria” (6966314N / 9557335E, Fig. 1), perjudicando decenas de viviendas y sus sistemas de aguas servi-

das, potable y alcantarillado pluvial. Las hipótesis que surgen para que se produzcan los deslizamientos lentos del terreno (reptación – solifluxión) tienen múltiples causas, por lo que se requiere evaluar geoquímicamente las aguas fuentes y manantiales para determinar el origen de dicho problema de inestabilidad geotécnica de la ladera y del suelo urbano y proponer alternativas para su mitigación.

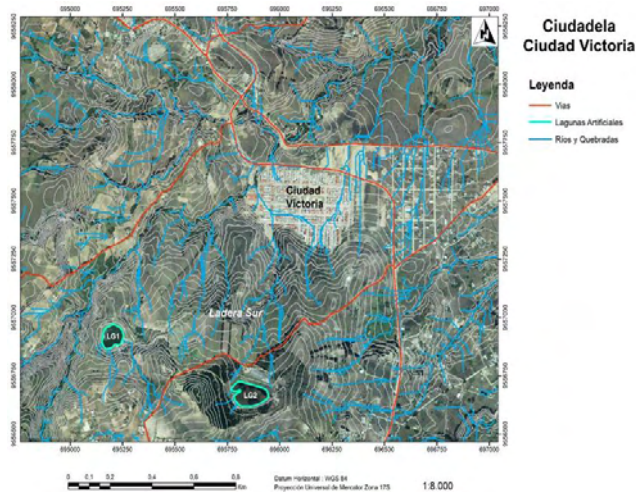


Fig. 1. Localización del área de la Ciudadela "Ciudad Victoria"- Loja, Ecuador

2 Procedimiento Experimental

Debido a que se trata de movimientos de masa lentos del terreno con detonantes relacionados con problemas hídricos y modificaciones de la topografía original de la localidad. Se plantea realizar las siguientes actividades:

Fotointerpretación de imagen de satelital, elaboración del mapa geológico y reconocimiento hidrogeomorfológico; análisis de la geofísica levantada en la zona (tomografías eléctricas y georadar), para conocer profundidad de nivel freático y su extensión lateral y vertical; ensayos de geoquímica de isótopos estables (O^{18} , H, Deuterio) y la elaboración de la interpretación de resultados, a través de la integración de los procedimientos geológicos e hidrogeomorfológico propuesto para establecer alternativas y recomendaciones de estabilización geológica (Fig.2).

El muestreo isotópico de agua se realiza para determinar calidad y cantidad de isótopos naturales de agua ($\delta^{18}O$) y deuterio (δD) como trazadores naturales, para establecer la correspondencia geoquímica del agua de las zonas fuentes y manantiales. Localización de zonas hídricas fuente (sumideros) y localidades manantiales (o efluentes). Se estiman tomar quince (15) muestras de agua; sistema lagunar – pantanos, quebradas, pluvial, del sistema de distribución y almacenamiento, manantiales y viviendas. El procesamiento de Isótopos estables se realizará con el equipo analizador de concentración de gases e isótopos L2130 –i (Laboratorio

de isótopos de la Universidad de Cuenca – Ecuador).

La elaboración de los perfiles geológicos – geoquímicos se realizó, a través de obtención de datos geológicos de campo, informes de perforaciones e imágenes de tomografías y georadar (radargramas) suministrados por SNGRE sede Loja - Ecuador, para la zona urbana de Ciudad Victoria.

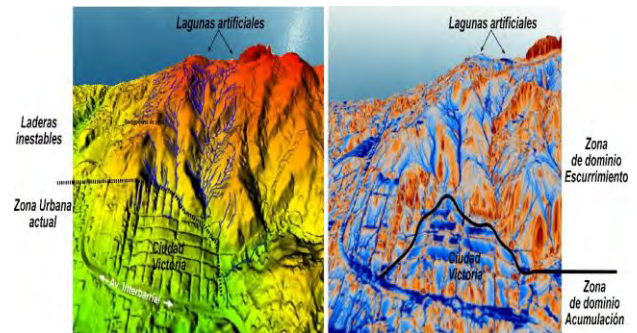


Fig. 2. Imágenes (DEM) del sector de Ciudad Victoria y su área de influencia, podemos reconocer las zonas de escurrimiento y acumulación dominantes de agua.

3 Discusión y resultados

3.1 Condiciones climatológicas del sector Ciudad Victoria

Los datos climatológicos registrados por la estación La Argelia (AP210- INAMHI) permiten determinar que el balance hídrico que afecta la zona de ciudad Victoria y áreas aledañas está determinada por excedentes pluviales en los meses de enero-mayo, siendo meses de recarga para el suelos y quebradas los meses de octubre – diciembre y el déficit hídrico desde julio a septiembre, con valores negativos de coeficiente de humedad (Fig. 3 y 4).

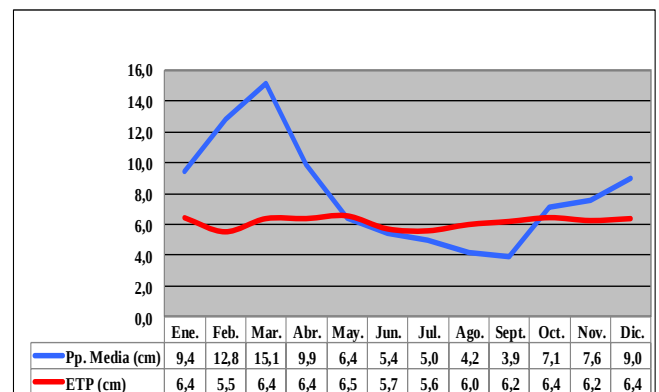


Fig. 3. Climograma de la estación La Argelia (AP210), comparación entre las variables precipitación media anual y evapotranspiración para el periodo 1960 – 2013.

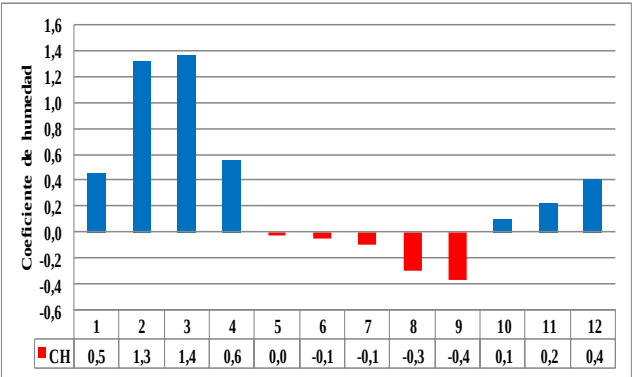


Fig. 4. Balance hídrico – coeficiente de humedad para el periodo 1960 – 2013.

El escurrimiento o desagüe en el sector de ciudad Victoria, se calculó a través de la aplicación del balance hídrico y se obtiene un escurrimiento promedio anual efectivo para los primeros cinco meses del año (enero a mayo) con un total promedio anual de 258mm, los registros máximos de 86 mm para el mes de febrero y 80mm para mayo, desde junio a diciembre se reporta escorrentías bajas a muy bajas, debido a lluvias esporádicas

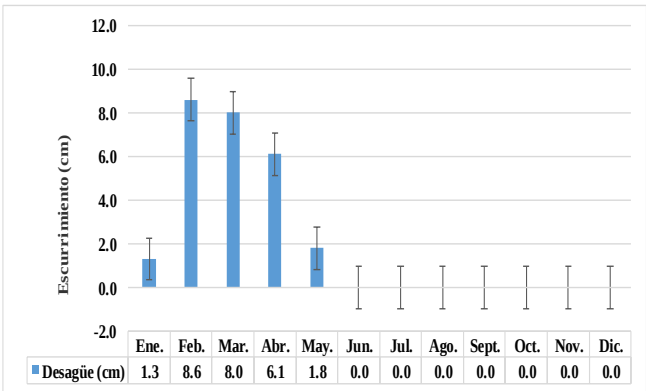


Fig. 5. Escorrentía pluvial o desagüe para ciudad Victoria y sus zonas aledañas. Estación la Argelia AP210. Periodo 1960 – 2013. (INAMHI, 2017)

El sector donde se localiza Ciudad Victoria forma parte de La subcuenca alta de la microcuenca de la quebrada Las Pavas, el sector drenado de la ladera (parte alta de Ciudad Victoria) tiene una extensión aproximada de 720.762,41m² (72,07 ha), considerando el valor de escurrimiento obtenido para el periodo 1960-2013, para los meses con valores positivos se estima:

Tabla 1. Escurrimiento mensual promedio estimado (m3) para el periodo

1960-2013. Ciudad Victoria y ladera sur para un área de escurrimiento de 720.762,4m²

Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	Total
Escurrimiento medio mensual aprox. (m/m ²)	0,013	0,086	0,08	0,061	0,24
Escurrimiento estimado (m ³) área de ladera superior Ciudad Victoria	9369,91	61985,57	57660,99	43966,51	172982,98

3.2. Condiciones geología y geomorfología

La localidad donde se encuentra ciudad Victoria – Tierras Coloradas, están compuestas en el substrato por rocas de las unidades geológicas Tres Lagunas (Trl, Jurásico) (INIGEMM 2017, Fig. 6) que consiste de rocas graníticas variablemente metamorizadas y cizalladas y la Unidad Agoyán (Pzla, Paleozoico) constituida por esquistos biotíticos intercalados con cuarcitas grises y paragneises con cuarzo y biotita. La cobertura rocosa superior está compuesta por rocas de la Formación San Cayetano (Msc, Mioceno) constituida por intercalaciones de areniscas, limolitas y lutitas y por rocas del Miembro La Banda (MLbd, Mioceno) constituida por calizas masivas, estromatolíticas, laminadas y dolomitas con lutitas que incluyen capas estratiformes de chert, además de areniscas calcáreas y diatomitas.

La zona de interés en el estudio se localiza sobre las rocas de la Formación Belén (MBe, Mioceno) constituida por lutitas y limolitas, se reconocen nódulos de yeso y concreciones carbonatadas y conglomerados y, parcialmente por rocas de la Formación Quillolaco (MPlq, Mioceno) compuesta por conglomerados gruesos clasto-soportados en una matriz arenosa intercalados con lentes métricos de areniscas.

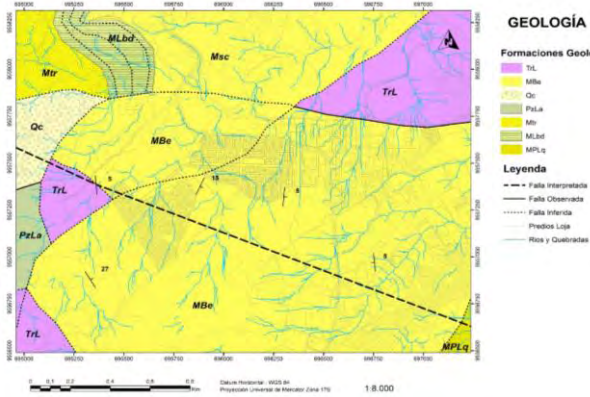


Fig. 6. Unidades geológicas del sector de Ciudad Victoria y zonas aledañas.

El área urbana de Ciudad Victoria y las laderas adyacentes

está compuesta esencialmente de rocas de tipo lutitas y limolitas con presencia de conglomerados y arenas con geometría canaliforme, que corresponden a paleocanales que pertenecen a la Formación Belén y acumulaciones aluviales cuaternarias de espesores métricos a decimétricos. De igual manera, el subsuelo de ciudad Victoria está compuesta por rocas esencialmente de tipo lutitas y limolitas grises con cuerpos lenticulares de conglomerados arenosos con alta porosidad y estratos de arenas de grano media a fino.

La sección geológica (A-A') corresponde a la parte media y superior de la ladera que ocupa la zona sur de Ciudad Victoria esta disectada por una falla geológica de rumbo (N30°W, Fig. 7), que produce la desviación del canal de la quebrada Las Pavas y posteriormente, se fusiona con el contacto de la secuencia Miocena de la Formación Belén y las rocas granitoides de la Unidad Tres Lagunas.

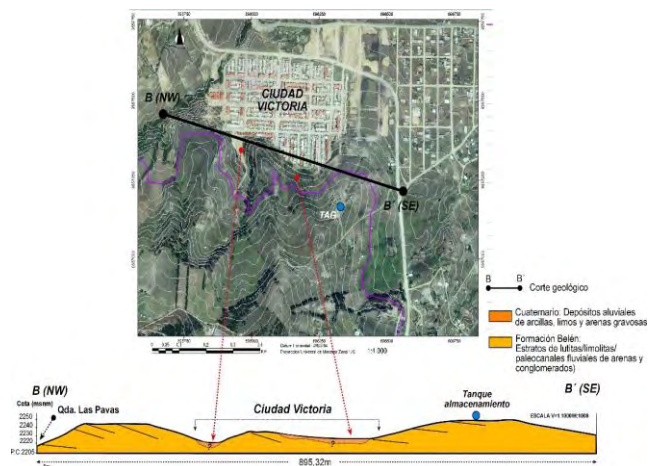


Fig. 7. Corte geológico (A-A') de la ladera sur de Ciudad Victoria.

Este rasgo estructural (falla geológica N30°W), produce una zona de debilidad que, permite la infiltración del agua de la quebrada Las Pavas, a niveles subterráneos especialmente en la sección media de la ladera. Así como, un ligero cambio de buzamiento de los estratos que varía de 25-27°NE a 5°SW, conformando un pequeño sinclinal que, favorece la acumulación e infiltración del agua de escorrentía de la ladera.

La sección geológica (B-B', Fig. 8), se reconoce una intercalación de estratos rocosos de lutitas y estratos canalizados de conglomerados arenosos y areniscas (paleocanal), que tienen un buzamiento que varía entre 5° a 17° SW y rumbos 67°NE y mantienen esta geometría en todo el subsuelo de la zona urbana de ciudad Victoria.

Esta geometría de los estratos permite el ingreso de agua de la quebrada Las Pavas a los niveles subsuperficiales y subterráneos del suelo y roca, tanto en la ladera sur de Ciudad Victoria como del suelo urbano, debido a esto la canalización proyectada de esta quebrada debe pasar aguas debajo

de la zona urbana de Ciudad Victoria.

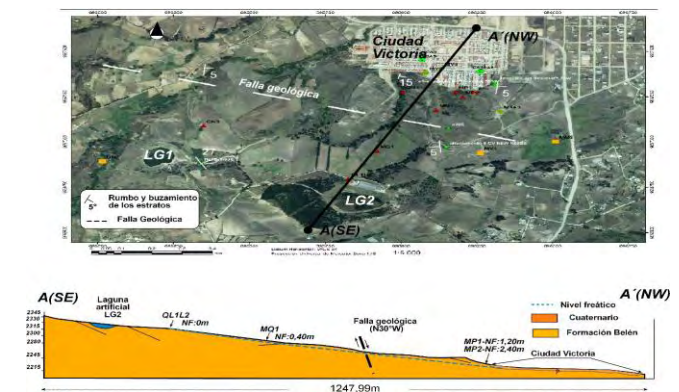


Fig. 8. Cortes geológicos (B-B'), donde se muestra la Formación Belén y la dirección de los estratos de rocas.

Informes de estudios geotécnicos y perforaciones aportados por SNGRE – Loja, elaborados en el año 2017 y 2021, permiten conocer que los niveles freáticos se encuentran entre 3 y 8 m del suelo. Mientras que, los suelos especialmente de tipo arcilloso (CH) y arcillo limoso (CL), se encuentran saturados en los primeros metros del suelo con índices de humedad entre 20,88% hasta 44,97% e índices plásticos variables entre 16,6 y 58,7 (Fig. 9).

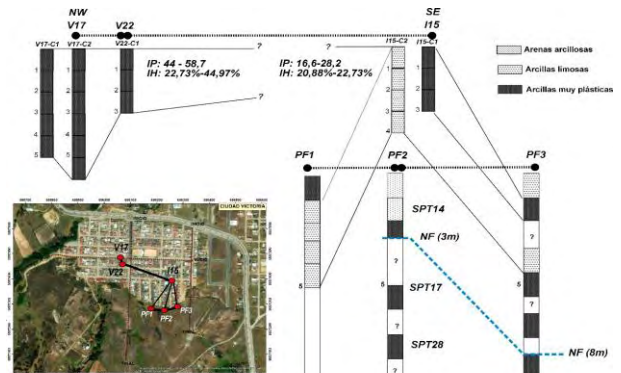


Fig. 9. Correlación de tipos geomecánicos de suelo de la zona urbana de Ciudad Victoria.

Los datos de tomografías (Fig. 10) y radargramas preliminares (Fig. 11), ejecutados por el SNGRE (2021) en la zona urbana de Ciudad Victoria, sugieren niveles de humedad fuera de las condiciones normales del subsuelo (5m) y, a niveles subterráneos en la zona urbana de ciudad Victoria (>15m), que interpretan sobresaturación y posibles acuíferos semi-confinados.

En cuanto al radargrama preliminar DAT_0409 (Fig. 11), elaborado en la calle Clotario Maldonado de Ciudad Victoria, con una longitud 150 m y profundidad 5 m, se puede observar los siguientes aspectos:

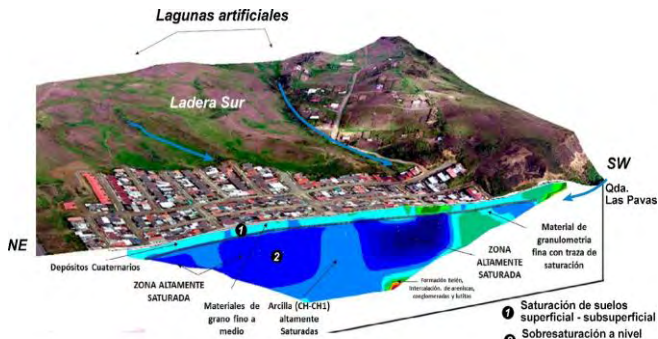


Fig. 10. Tomografía línea 2 transversal a la dirección del flujo superficial de "Ciudad Victoria".

a) Deformación del suelo desde los 10 me hasta los 110 m de longitud a una profundidad de 80 cm aproximadamente (producto de alteración del material del suelo para obras viales, tuberías, etc.).

b) Se puede interpretar fuga de agua entre los 2 - 3 m de profundidad, como se aprecia en la figura de color amarillo (Fig.11), debido a la saturación del suelo, posiblemente proveniente de aguas pluviales, residuales o potable.

c) A partir de los 3 m de profundidad, no se observa con claridad en el radargrama, debido a la receptividad negativa, esto se debe principalmente a las características del suelo de textura arcillosa y al contenido de humedad presente en el suelo.

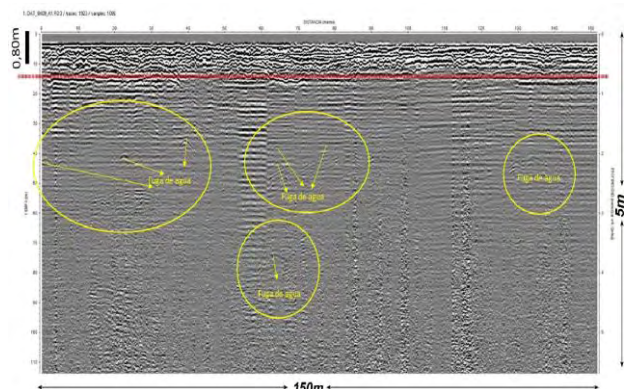


Fig. 11. Imagen de radargrama DAT_0409 levantado en la calle Clotario Maldonado de Ciudad Victoria

3.3. Geoquímica de isótopos naturales de agua

La evaluación hidrogeomorfológica realizada para reconocer geoformas afectadas por excedentes de agua (saturados), es clave en la toma de muestras de agua para el análisis de geoquímica de isótopos naturales, donde se consideran zonas fuentes y manantiales hídricos, se recolectaron y procesaron un total de 15 muestras de agua para análisis geoquímicos de isótopos naturales oxígeno ($\delta^{18}\text{O}$) y deuterio ($\delta^2\text{D}$) (Tabla 2), la distribución espacial se puede observar en la Fig. 12.

Tabla 2. Muestreo geoquímico de agua para análisis de isótopos en Ciudad Victoria – Loja.

Código de campo	Norte	Este	O18_Calculado	D_Calculado
MP1	9557277	696180	-6,8087222	-50,0453678
MV2	9557381	696081	-10,001678	-65,1566235
MM1	9557176	696116	-6,85122971	-50,3737217
MV1	9556939	696262	-8,20015493	-52,4192783
QL1L2	9556796	695826	-7,06560209	-51,5445129
MTA3	9557168	696328	-10,1181914	-65,1179563
MPL1	9557381	696081	-13,0689462	-97,5492505
MM2	9557002	696509	-8,43868625	-54,5859074
QN4	9557278	696006	-7,33104464	-52,5362306
TA2	9555665	694576	-7,90137915	-50,4532747
MV3	9557406	696134	-10,1215553	-65,1055955
MQ1	9556950	695921	-6,82431848	-50,6409055
MP2	9557249	696203	-7,49709914	-54,2014544
TA1	9555665	694576	-7,87477374	-50,524904
QN2	9556892	695015	-8,75856287	-56,6013543
QN3	9557089	695349	-7,03471534	-49,1740887

Los resultados obtenidos en la aplicación de esta técnica permiten reconocer cuatro afinidades geoquímicas para sitios fuentes y manantiales para la zona de ciudad Victoria (Fig. 12 y 13), que permiten llegar a la siguiente clasificación:

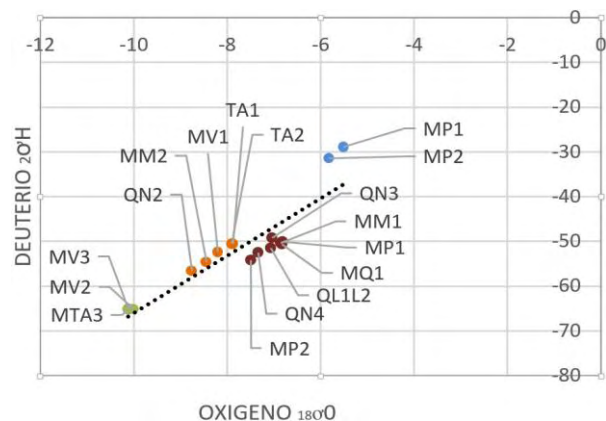


Fig. 12. Distribución del muestreo geoquímica de agua para análisis isotópico

a) **Afinidad geoquímica 1:** Comprende las muestras provenientes de los servicios de agua potable de la localidad y agua de la quebrada Las Pavas, así como a manantiales en terrenos con geoformas de saturadas (Tabla 3).

Tabla 3. Muestras de la afinidad química 1.

Código de campo	Norte	Este	O18_ Calculado	D_ Calculado
MV2	9557381	696081	-10,001678	-65,15662
MTA3	9557168	696328	-10,1181914	-65,11795
MV3	9557406	696134	-10,1215553	-65,10559
(Anglada, y otros 2002) (Anglada, y otros 2002) (Anglada, y otros 2002) (Anglada, y otros 2002)				

b) Afinidad geoquímica 2: Se reconocen las muestras obtenidas en perforaciones, lagunas artificiales y manantiales de terrenos diversos en zona de laderas.

Tabla 4. Muestras afinidad química 2.

Código de campo	Norte	Este	O18_ Calculado	D_ Calculado
MP1	9557277	696180	-6,8087222	-50,0453678
MM1	9557176	696116	-6,85122971	-50,3737217
QL1L2	9556796	695826	-7,06560209	-51,5445129
QN4	9557278	696006	-7,33104464	-52,5362306
MQ1	9556950	695921	-6,82431848	-50,6409055
MP2	9557249	696203	-7,49709914	-54,2014544
QN3	9557089	695349	-7,03471534	-49,1740887

c) Afinidad geoquímica 3: Sistema de agua de potable en viviendas de la localidad y tanque de almaceamiento de Ciudad Victoria.

Tabla 5. Muestras afinidad química 3.

Código de campo	Norte	Este	O18_ Calculado	D_ Calculado
MV1	9556939	696262	-8,20015493	-52,4192783
MM2	9557002	696509	-8,43868625	-54,5859074
TA2	9555665	694576	-7,90137915	-50,4532747
TA1	9555665	694576	-7,87477374	-50,524904
QN2	9556892	695015	-8,75856287	-56,6013543

d) Afinidad geoquímica 4: Corresponde con las muestras de agua pluvial (MP1, MP2), que no tienen afinidad geoquímica con ninguna muestra obtenida en las localidades de Ciudad Victoria.



Fig.13. Distribución de la afinidad geoquímica de agua para la ladera sur y zona urbana de Ciudad Victoria.

4. Propuestas y alternativas de mitigación

La capacidad de almacenamiento de agua de las lagunas artificiales se estima en (Tabla 3), condenado como una zona de aporte clave en la inestabilidad de la ladera y en la pérdida de estabilidad geomecánica de los suelos urbanos.

Tabla 6. Estimación de la capacidad de almacenamiento de las lagunas artificiales (LG1, LG2).

Lagunas artificiales (Ciudad Victoria)	Área (m ²)	Volumen (m ³) actual (Prof. 0,60m)	Volumen (m ³) óptimo (Prof. 1m)
LG1	8150	4890,0	8150
LG2	13109	7865,4	13109
Total	21259	12755,4	21259

Si consideramos el aporte pluvial (Tabla 1) y los valores efectivos de aporte de agua transvasada para almacenamiento en lagunas artificiales (LG1 y LG2), se demuestra la existencia de aportes de agua de manera constante al suelo y subsuelo como recargas de "acuíferos" y niveles freáticos altos durante el todo el año. Debido a esa situación y considerando que el agua que alimenta los niveles de suelo y subsuelo de la ladera sur y zona urbana de Ciudad Victoria provienen, en parte del transvase de agua desde la zona de captación de la quebrada Las Pavas en el sector de Tierras Coloradas, según los resultados de las afinidades geoquímicas del agua (Fig. 13), se propone:

a) Colocar en el fondo y en los laterales de las lagunas artificiales (LG1, Fig. 14 y LG2, Fig. 15), geotextiles impermeables que permitan la captación de agua de lluvia de la parte superior de la ladera Sur. Además, se debe realizar recuperaciones geo-ecológicas con siembras de gramíneas (vetiver - *Chrysopogon zizanioides*). Se propone no eliminar dichas zonas lagunares artificiales, pues la topografía original fue modificada y esas zonas sirven de captación de

aguas pluviales.

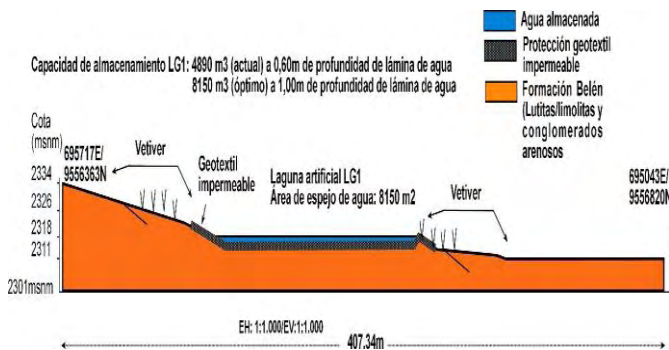


Fig. 14. Sección topográfica aproximada de Laguna LG1.

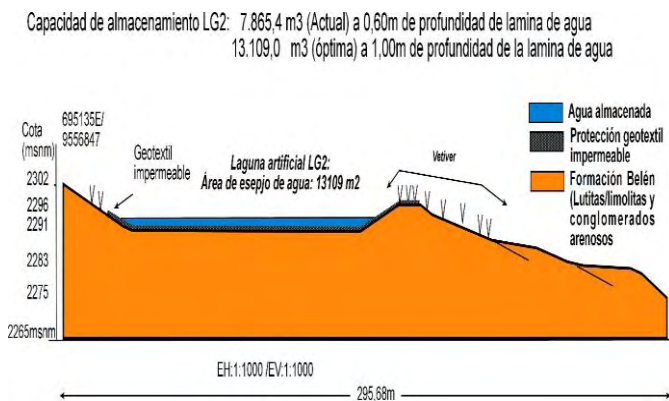


Fig. 15. Sección topográfica aproximada de Laguna LG2.

b) Diseñar y ejecutar el encauzamiento de una sección de la quebrada Las Pavas (desde la localidad de sección fallada del canal hasta la localidad de tarazado vial de Av. Interbarrial, Fig. 16).

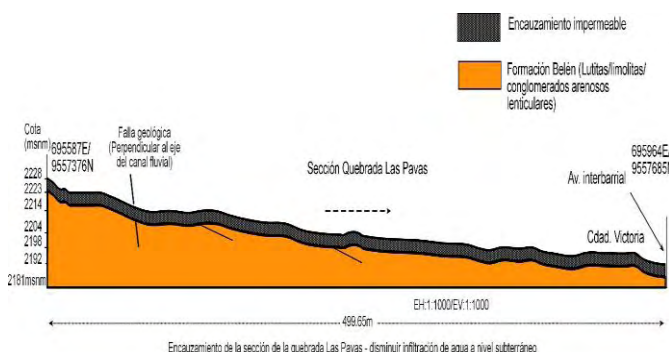


Fig. 16. Sección aproximada del encauzamiento de la quebrada Las Pavas.

Finalmente, el agua que se acumule en las lagunas LG1 y LG2, debe ser drenada fuera de la sección de la ladera sur, para eliminar el proceso de infiltración se proponen posibles secciones de trazados de drenajes con protección de geotextil impermeables, para lo cual se requiere evaluación con sondeos eléctricos verticales (geofísica – SEV) y perforaciones que indiquen la profundidad de las secciones de drenaje para evitar el desplome de los drenajes.

5. Conclusiones

De los resultados obtenidos en la evaluación geológica integral, podemos señalar que la técnica de geoquímica de isótopos naturales de agua (^{18}O y ^2H), utilizada como trazadora de los flujos de ingreso-egreso del sistema hídrico, permite con ayuda de la evaluación geofísica (tomografías, radargramas y sondeos eléctricos verticales) y reconocimiento geológico de superficie, determinar los problemas de hidrogeomorfológicos que afectan las laderas y taludes y, que inestabilizan terrenos colocando en riesgos de desastres a la población.

El análisis integrado de técnicas de la geología permite determinar con bastante exactitud, las localidades donde se deben realizar las medidas de mitigación que, permita reducir el problema del riesgo residual a la que están expuesta la población, con el propósito de salvaguardar vidas y bienes materiales.

Referencias

- Auge, M. (2008). Métodos Geoelectrónicos para la Prospección de Agua Subterránea [Archivo PDF]. <http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/miguel/ProspeccionGeoelec.pdf>
- Cruden, D. M., Varnes D. J. (1996). Landslides types and processes. In: Landslides investigation and mitigations. Transportation Research Board Special Report 24 (Turner and Schuster Eds), p. 36-75.
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología – INAMHI (2014). Anuario Meteorológico 2011. O. 51-2011. Quito - Ecuador. 137p. www.serviciometeorologico.gob.ec
- Instituto Nacional de Investigaciones Geológicas Minera y Metalúrgicas - INIGEMM (1977). Mapa geológico del Ecuador. Hoja de Loja (56), escala 1:100.000.
- Instituto geográfico Militar (IGM). Ministerio de Recursos Naturales y Energéticos (MRNE). Dirección de General de Geología y Minas (DGGM).
- Barberena-Moncada, J., Hurtado-García, I., Sirias-Silva, M. (2021). Aplicación de Isótopos estables e hidroquímica para la comprensión del sistema hidrológico en Laguna de Tiscapa. Managua, Nicaragua. Revista Científica FAREM – Estelí. 10 (37). DOI: <https://doi.org/10.5377/farem.v0i37.11211>.
- Bergamino, L., Tudurí, A., Bueno, C., Brugnoli, E., Valenzuela, L., Martínez, A., Pérez, L., Scarabino, F., García-Rodríguez, F. (2017). Aplicación de isótopos estables como indicadores de flujos de energía en ambientes costeros de Uruguay. *Revista del laboratorio tecnológico del Uruguay. INNOTECH*, No. 13 (09 - 18) · [dx.doi.org/10.26461/13.01](https://doi.org/10.26461/13.01)
- Valencia, F., D'Alterio, F. (2014). Aplicaciones de la geoquímica isotópica para la determinación del origen

de los gases no hidrocarburos del campo Perla, sub-bloque Cardón IV-oeste. *Memorias del I Congreso Venezolano de Gas Natural (ICVGAS)*, Por-lamar, Venezuela, noviembre 24-28.

Martín, J., Muñoz-García, M. (2015). Estratigrafía de isótopos de oxígeno y la reconstrucción de los cambios climáticos del pasado. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 23 (2). (edición electrónica): 2385-3484.

Mook, W. G. (2002). Isótopos Ambientales en el Ciclo Hidrológico. Ciclo Global del Agua. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid.

Recibido: 5 de diciembre de 2022

Aceptado: 20 de marzo de 2023

Guerrero, Omar Antonio: Geógrafo. MSc y estudios doctorales en Ciencias Geológicas. Profesor Geomorfología y Riesgos Geológicos UTPL y ULA.

 <https://orcid.org/0000-0002-8859-2906>

Benavides- Rojas, Mario: Ing. Geólogo. Msc en Gestión de Riesgos de Desastre. Coordinador del Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencia. Zona 7. Loja – Ecuador. Correo electrónico: mariofabianbr@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-0000-0002-9428-8716>

Toro-Mora, Rosibeth: Especialista en Gestion de Abastecimiento, recolección y tratamiento de agua (CIIAT-ULA) y doctorado en Ciencias Geológicas (Zaragoza-España). Profesora en el área de geología de campo y colaborador en Hidrogeología y Geofísica en la Escuela de Ingeniería geológica de la ULA-Mérida. Correo electrónico: ingrosibethtoro@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-1252-3584>

Uzcátegui-Salazar, Marisela: Prof. Titular Escuela de Ingeniería Geológica. ULA. PhD. Candidata en Hidrología y Gestión de los Recursos Hídricos. MSc en Desarrollo de los Recursos de Aguas y Tierras. Ingeniero Civil. Hidrogeólogo. Correo electrónico: mariselauzcateguis@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-2894-5925>

Hervé, Jégat: Profesor Titular CIDIAT- ULA. PhD. Mecánica de Fluidos. Ingeniero Hidráulico. Profesor Titular. Centro Interamericano de Desarrollo Ambiental y Territorial. ULA. Correo electrónico: [hjégat@gmail.com](mailto:hjegat@gmail.com)

 <https://orcid.org/0000-0003-0185-2873>

