



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN CIENCIAS DE LA
TIERRA**

**“ANÁLISIS MORFODINÁMICO Y ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA DEL
COMPLEJO VOLCÁNICO DE LA PRIMAVERA, JALISCO”**

*“MORPHODYNAMIC ANALYSIS AND ESTIMATION OF WATER EROSION OF THE LA
PRIMAVERA VOLCANIC COMPLEX, JALISCO”*

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRA EN CIENCIAS

CON ESPECIALIDAD EN:

GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO

PRESENTA:

ING. CONSUELO SELENE GUZMÁN CERVANTES

ASESOR

DRA. MARÍA LOURDES GONZÁLEZ ARQUEROS

COASESOR

DR. JESÚS ARTURO MUÑOZ JÁUREGUI

MORELIA, MICHOACÁN. FEBRERO 2024.

"A los jóvenes en estos tiempos de crisis, les puedo decir que la mejor arma es la imaginación y la creatividad, que su imaginación crezca y sus sueños no se detengan"

Dr. Víctor Hugo Garduño Monroy

QDEP



Agradecimientos

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada para la realización de esta tesis, y a este posgrado por haberme permitido ser parte de él y por convertirse en una pieza clave en mi formación, siempre me sentiré orgullosa de haber pertenecido al Instituto de Investigación en Ciencias de la Tierra y a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Gracias a todos los administrativos y docentes que con su trabajo hicieron posible mi paso por aquí.

Agradezco enormemente a mis asesores de tesis, el Dr. Jesús Arturo Muñoz Jáuregui y a la Dra. María Lourdes González Arqueros, por nunca rendirse conmigo y apoyarme tanto con sus consejos, motivaciones, explicaciones infinitas y gran paciencia, muchas gracias, sin ustedes nada, y con ustedes todo.

Siempre agradeceré y recordaré con especial cariño a mi gran maestro y mentor, el Dr. Víctor Hugo Garduño Monroy, gracias a usted en primer lugar me quedé en las Geociencias y después me (de) formé (como usted decía) en la Geomorfología en este posgrado. Lo llevo en mi corazón, por siempre agradecido, por el gran ser humano que fue conmigo, por creer en mí e impulsarme siempre para ser mejor. Mil gracias mi Doc.

Un especial agradecimiento a mis profesores, que durante mi paso por el posgrado me regalaron sus enseñanzas, su tiempo, esfuerzo, y su pasión por la ciencia: Dr. Garduño, Dr. Arturo, Dra. Erna, Dra. Isabel (mi doctora linda, gracias!), Dra. Lulú, Dr. Macías, M.C. Felipe, Dr. Denis, Tec. Fabiola, Dr. Xavier, Dra. Alcalá y Dr. Armando.

Gracias al laboratorio de Edafología de la Facultad de Biología, perteneciente a la UMSNH, por abrirme gratamente las puertas de sus instalaciones para realizar mis análisis de suelos, en especial a la Dra. María Alcalá de Jesús por sus consejos, enseñanzas, tiempo y amabilidad. También agradezco por su ayuda a Mayte, Félix, Selena, Brenda y Mayra.

A mis compañeros y amigos del CeMIE Geo P17 y del posgrado: Adrián, Oscar, Mimí, Félix, Julio, Abraham, Agustín y Sonia, muchas gracias por su ayuda, su tiempo y por todos los momentos geniales que pasamos juntos, haciendo que los momentos pesados se aligeraran con risas.

Muchas son las mentes y manos que han dado forma a este trabajo, y a todas ellas agradezco inmensamente, si olvido nombrar alguna le pido me disculpe y sepa aceptar mi sincero agradecimiento.

Dedicatoria

A mi familia,

Una especial dedicatoria y agradecimiento a mis padres Álvaro y Lupita, porque son mis pilares más grandes, un ejemplo diario de amor, de fortaleza, de seguir adelante y no rendirse con lo que uno quiere, gracias por ser incondicionales conmigo y apoyarme siempre a pesar de todo. Gracias a ustedes, porque hoy estoy aquí, y le doy gracias a Dios que están conmigo, los amo infinitamente.

Gracias a mis hermanas Mary, Diana y Lupita por el apoyo que siempre me brindan, por siempre creer en mí y darme su apoyo y sus ánimos, las amo; me siento bendecida de tenerlos a todos.

Contenido

	Página
Resumen	1
Summary	3
CAPÍTULO I	
1.1 Introducción	5
1.2 Justificación y planteamiento del problema	10
1.3 Hipótesis	11
1.4 Objetivos	12
CAPÍTULO II	
2.1 Antecedentes	13
2.2 Marco teórico	17
2.2.1 Erosión hídrica	17
2.2.2 Ecuación RUSLE	18
2.2.3 Ecuaciones para estimar la erosión (USLE/ RUSLE) y los SIG	20
CAPÍTULO III	
3. Materiales y métodos	22
3.1 Área de estudio	22
3.2 Morfometría	28
3.3 Marco geológico	34
3.3.1 Marco geológico-tectónico regional	34
3.3.2 Evolución geológica del CVLP	35
3.3.3 Geomorfología	42
3.4 Metodología	49
3.4.1 Análisis morfodinámico	49
3.4.2 Erosión hídrica: Factores de la ecuación RUSLE	52
3.4.3 Estimación de las tasas de pérdida de suelo (real y potencial)	62

CAPÍTULO IV

4. Resultados	63
4.1 Análisis morfodinámico	63
4.1.1 Morfologías	65
4.2 Ecuación RUSLE	73
4.2.1 Factor R (erosividad de la lluvia)	73
4.2.2 Factor K (erodabilidad del suelo)	74
4.2.3 Factor LS (topografía)	75
4.2.4 Factor C (manejo y cobertura vegetal)	76
4.3 Erosión hídrica real	78
4.3.1 Erosión hídrica real anual por unidad volcánica	80
4.4 Erosión hídrica potencial	82
4.4.1 Erosión hídrica potencial anual por unidad volcánica	84

CAPÍTULO V

5. Discusión de los resultados	87
5.1 Morfología y morfodinámica del Complejo Volcánico La Primavera	87
5.2 Estimación de la erosión hídrica en el Complejo Volcánico La Primavera	89
5.3 Comportamiento de la erosión hídrica en las unidades morfológicas del CVLP	94

CAPÍTULO VI

6. Conclusiones	97
Referencias citadas	100
Índice de figuras	106
Índice de tablas	111

Resumen

El Complejo Volcánico de La Primavera (CVLP) es un área natural que cuenta con una gran diversidad de geoformas, producto de la coexistencia tanto de procesos geológicos internos y externos, así como de procesos antrópicos. Los procesos morfodinámicos dentro del CVLP están asociados a la erosión hídrica, transporte y sedimentación de material geológico. Dentro de estos procesos se encuentran los procesos de remoción en masa, deposición fluvial, deposición aluvial-coluvial, alteración hidrotermal, bancos de material extractivo, aunque el proceso predominante es la erosión hídrica laminar y concentrada. En este estudio se muestra un análisis cartográfico detallado de los procesos morfodinámicos dentro del CVLP, así como la estimación cuantitativa de la erosión hídrica por unidad volcánica en un escenario real y uno potencial mediante el uso de la ecuación RUSLE. El análisis morfodinámico reveló una alta densidad de barrancas con patrones de drenaje diverso, producto de la erosión concentrada o fluvial y un control tectónico-estructural, desarrollándose principalmente en las unidades volcánicas compuestas por sedimentos vulcano-lacustres y flujos piroclásticos. Se cartografiaron 480 procesos de remoción en masa de tipo flujo y 6 de tipo avalancha, 17 bancos extractivos de material pétreo, 11 plataformas de pozos geotérmicos, y al menos 15 zonas de alteración hidrotermal. En cuanto a la erosión hídrica, el modelo reportó valores que van de 0 a ~250 t/ha*año, predominando la erosión de tipo normal y ligera en un 78.81% de la superficie. El escenario potencial reportó valores desde 0 hasta ~2100 t/ha*año, predominando la erosión de tipo catastrófica y severa en más del 90% de la superficie. Los resultados de este estudio muestran la diversidad de procesos morfodinámicos, geoformas y agentes antrópicos que hacen que el CVLP tenga una fragilidad particular en la conservación de sus suelos. Las principales aportaciones de este trabajo incluyen la estimación cuantitativa

de la erosión hídrica en las unidades geomorfológicas del CVLP mediante la ecuación RUSLE y sistemas de información geográfica; la elaboración del primer mapa morfodinámico de la zona, que clasifica y muestra los distintos procesos exógenos que contribuyen a modelar la morfología del CVLP. Se espera que este estudio ayude en la toma de decisiones para una mejor planificación del uso del suelo y conservación de La Primavera en todas sus vertientes.

Palabras clave: geomorfología volcánica, pérdida de suelo, Área Natural Protegida, procesos exógenos, suelos.

Summary

The La Primavera Volcanic Complex (CVLP) is a natural area of flora and fauna protection with an approximate age of 95 thousand years that has a great diversity of geoforms, product of the coexistence of both internal and external geological processes, as well as anthropic processes. The morphodynamic processes within the CVLP are associated with water erosion, transport and sedimentation of geological material. These processes include mass removal, fluvial deposition, alluvial-colluvial deposition, hydrothermal alteration, and banks of extractive material, although the predominant process is laminar and concentrated water erosion. Ignorance of the dynamics, distribution, categorization and quantitative estimation of these processes when implementing projects and activities within the CVLP puts its ecological balance at risk. This study shows a detailed cartographic analysis of the morphodynamic processes within the CVLP, as well as the quantitative estimation of water erosion per volcanic unit in an actual and a potential scenario using the RUSLE equation. The morphodynamic analysis revealed a high density of gullies with diverse drainage patterns, product of concentrated or fluvial erosion and a tectonic-structural control, developing mainly in the volcanic units composed of volcano-lacustrine sediments and pyroclastic flows. A total of 480 flow-type and 6 avalanche-type mass removal processes, 17 extractive banks of stone material, 11 geothermal well platforms, and at least 15 hydrothermal alteration zones were mapped. Regarding water erosion, the actual scenario reported values ranging from 0 to ~250 t/ha*year, with normal and light erosion predominating in 78.81% of the area. The potential scenario reported values from 0 to ~2100 t/ha*year, with catastrophic and severe type erosion predominating in more than 90% of the surface area. The results of this study show the diversity of morphodynamic processes,

geoforms and anthropic agents that make the CVLP particularly fragile in the conservation of its soils. The main contributions of this work include the quantitative estimation of water erosion in the geomorphological units of the CVLP using the RUSLE equation and geographic information systems; the elaboration of the first morphodynamic map of the area, which classifies and shows the different exogenous processes that contribute to model the morphology of the CVLP. It is hoped that this study will help in decision making for better land use planning and conservation of La Primavera in all its slopes.

1.1 Introducción

El Complejo Volcánico de La Primavera (CVLP) tiene una extensión aproximada de 379 km², cuenta con una gran diversidad de estructuras volcánicas: una caldera, domos riolíticos, flujos piroclásticos y depósitos lacustres, entre otros (Maciel-Flores & Rosas-Elguera, 1992). Por su cercanía con la ciudad de Guadalajara, México, representa el principal pulmón verde y vertedero natural de CO₂ de la ciudad. Desde 1980 fue declarada Área Natural Protegida (ANP) (CONANP-SEMARNAT, 2000), y a partir del año 2000 su categoría es Área de Protección de Flora y Fauna, además de ser un sitio de una alta importancia para la investigación en materia forestal, histórica, geológica, biológica, y ecológica, sin dejar a un lado que es un sitio de recreo y deporte (Figura 1).

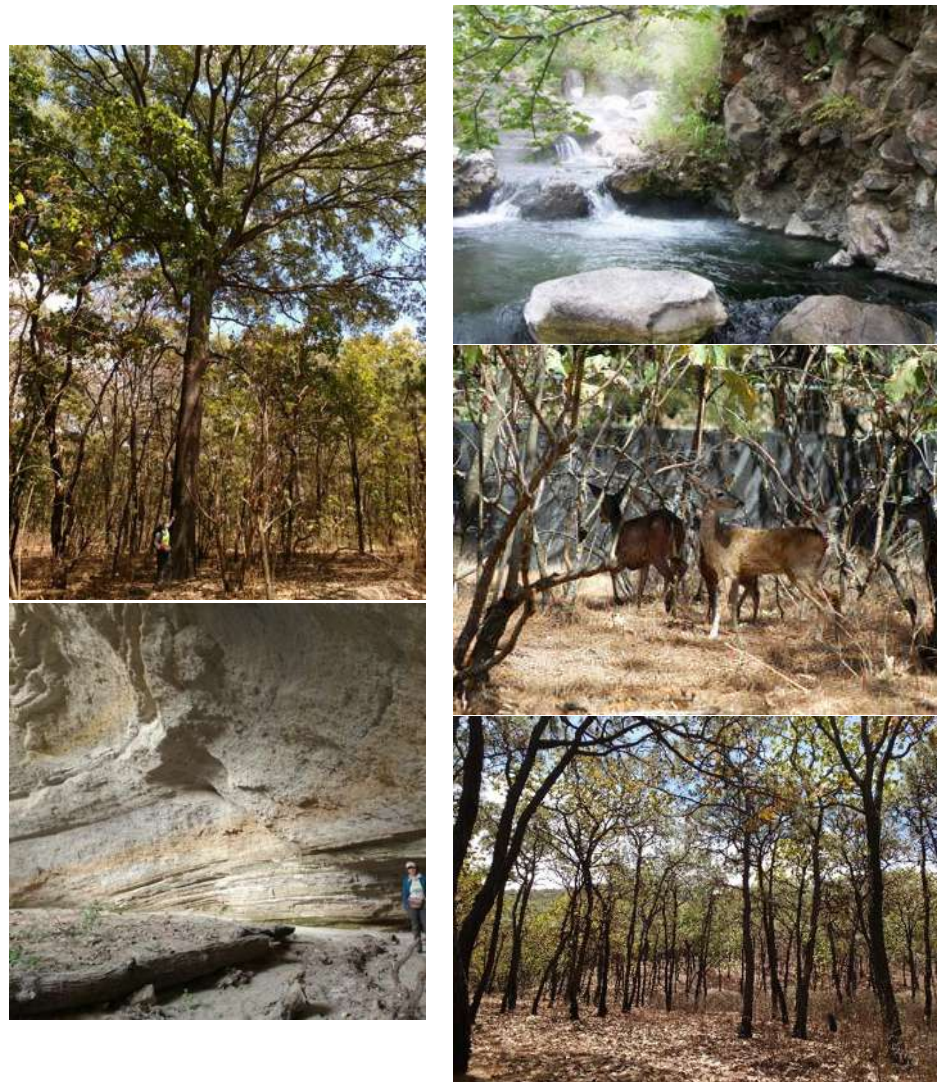


Figura 1. Vegetación, fauna y belleza natural del Complejo Volcánico La Primavera.

La Primavera es un área amenazada, donde sus principales problemas ambientales son: 1. Incendios, 2. Erosión hídrica 3. Cambio de uso de suelo (deforestación), 4. Explotación de material geológico y 5. Vertederos de basura. Además, la expansión de la zona urbana, las actividades recreativas no reguladas y construcción de obras públicas, como el Macrolibramiento y las zonas residenciales en el domo el Tajo, agregan presión ambiental por deforestación y cambio de uso de suelo (CONANP-SEMARNAT, 2000) (Figura 2).



Figura 2. Vista del macrolibramiento, al oeste del CVLP, el cual corta perpendicularmente a la unidad de flujos piroclásticos (Toba Tala).

Cuenta con un yacimiento geotérmico, que ha sido estudiado desde la década de los 70's del siglo pasado y es considerado como un sitio óptimo para la producción de energía eléctrica (Banwell & Valle, 1970). A finales de los 70's y principios de los 80's la Comisión Federal de Electricidad inició los trabajos de exploración del proyecto conocido como Cerritos Colorados (CC), un área de aprovechamiento especial de 448.9 ha en la parte centro de la caldera (Cervantes, 2009). Como parte de este proyecto se realizaron obras como perforación de pozos de exploración, plataformas para infraestructuras y caminos pavimentados, entre otras, que demandaron cambios en el uso de suelo y en la morfología (Cervantes, 2009). Esto provocó un impacto ambiental y visual negativo, ya que se observó un suelo desnudo en muchas áreas y rasgos evidentes de erosión hídrica importante, obligando a suspender el proyecto exploratorio.

Actualmente, la Ley de Energía Geotérmica abre la posibilidad de que se reanuden las actividades de este proyecto geotermoeléctrico. Debido a esto se retomaron los estudios de exploración del yacimiento geotérmico de Cerritos Colorados, con trabajos enfocados a la caracterización del mismo principalmente.

La conservación y manejo óptimo del suelo es importante, ya que entre muchas funciones del suelo es la capacidad de ser un sumidero natural de carbono orgánico, de regular el clima, de proveer alimento y ser sustento de la vida. En detrimento de su cuidado están los procesos exógenos, como la erosión hídrica, la erosión eólica, los procesos de remoción en masa, entre otros, que modelan el relieve terrestre y ocurren de manera natural y/o antropogénica a un determinado ritmo.

Una de las causas que deja el suelo descubierto y actúa en detrimento de la erosión hídrica en esta zona son los incendios (Figura 3). Según CONANP-SEMARNAT (2000) el promedio de incendios en La Primavera es de cinco al año. Al dejar el suelo desprovisto de cubierta vegetal, aumenta el efecto erosivo de la lluvia, cuyo momento crítico ocurre durante las primeras lluvias del año, cuando la vegetación es todavía escasa. La incineración de los suelos puede causar un efecto hidrofóbico en ellos (Jaramillo, 2006), lo cual dificulta la infiltración del agua y puede causar mayor escurrimiento superficial y por ende mayor arrastre de partículas (erosión hídrica).



Figura 3. Área afectada por un incendio en 2018, donde se observa que el fuego dañó el arbolado que existía y eliminó la capa superficial de ojarasca. Imagen tomada en abril 2018.

La geomorfología del CVLP juega un papel determinante en la pedogénesis de los suelos, así como también en los procesos exógenos. Las diferencias topográficas (inclinación de la pendiente, disección, rugosidad, entre otras) de las unidades morfológicas, determinan en gran parte el grado de erosión, por ejemplo, las unidades con rangos altos de pendiente o mayormente disectadas tienden a presentar valores de erosión hídrica más altos. Otra característica de las unidades morfológicas que determina el grado de erosión hídrica de los suelos, es el material parental de los mismos. Debido a la historia geológica del CVLP existe una diversidad de materiales primarios disponibles para la formación de suelos, entre los principales existen rocas riolítica (unidades de flujo y domos), depósitos de cenizas y pómez, sedimentos lacustres (secuencias vulcano-lacustres) y tobas (flujos piroclásticos). El material parental es un factor determinante en las características de los suelos, tales como estructura,

textura, porosidad, contenido de carbonatos, entre otras, las cuales a su vez condicionan la erodabilidad de los mismos. Aunque existen diversos métodos para estudiar la erosión hídrica de suelos (directos como clavos y rondanas, trampas de erosión, transecto de cárcavas, entre otros; e indirectos como USLE, USPED, comparación de imágenes satelitales, entre otros), en este trabajo se eligió la ecuación RUSLE por varias razones, una de ellas es que es un método comprobado y de los más utilizados, mantiene compatibilidad con los SIG y facilita la estimación de grandes áreas, además, por ser un método indirecto es económico.

Al tratarse de un Área de Protección de Flora y Fauna, se decidió conveniente analizar dos escenarios de erosión hídrica posibles: el escenario real, el cual se puede decir que toma en cuenta las características actuales de la zona de estudio; y el escenario potencial, en el cual se anula la cobertura vegetal simulando una zona deforestada y buscando estimar la erosión hídrica en condiciones críticas.

La geomorfología dinámica o geodinámica externa por su parte, analiza las formas y distribución de los procesos exógenos, y permite visualizar rasgos en el relieve relacionados con la erosión, deposición de sedimentos, procesos de remoción en masa, y otros procesos modeladores activos.

1.2 Justificación y planteamiento del problema

El impacto negativo que puede tener el cambio de uso de suelo sobre la degradación del suelo en el Complejo Volcánico La Primavera quedó comprobado en la década de los 80's con el desarrollo del proyecto geotermoelectrico de Cerritos Colorados (CC). Sus obras tuvieron un impacto ambiental negativo importante en detrimento de la erosión hídrica del lugar y la deforestación, provocando la cancelación del proyecto en 1989 (Cervantes, 2009).

Actualmente se han retomado los estudios en esta zona, sugiriendo una próxima reactivación del proyecto. Sin embargo, no existen trabajos que hayan evaluado la erosión hídrica actual, no sólo del área de CC, sino de todo el complejo. Por este motivo, al no tomar en cuenta este proceso físico y no incluirlos como estudios básicos en la planeación del campo geotérmico es altamente probable que se vuelva a romper el delicado equilibrio del área y conlleve a un aumento de erosión hídrica causando cambios negativos e irreparables para sus suelos.

Este trabajo retoma la importancia y necesidad de analizar la erosión hídrica en el CVLP, conocer cuánto se erosiona, dónde ocurre, con qué intensidad e identificar qué factores intervienen, para poder abordar acciones que incluyan el manejo del suelo de manera más sustentable, eficiente y preventiva.

La diversidad geológica-geomorfológica del CVLP ha sido documentada y plasmada en mapas por muchos autores, sin embargo, la cartografía de la variedad de procesos exógenos (naturales y antrópicos) que se encargan actualmente de la modelación del paisaje de La Primavera no ha tenido la misma importancia. Con la finalidad de resaltar dichos procesos y entender su comportamiento y el papel que juega cada uno en la modificación del relieve de La Primavera, en este trabajo se realizó la cartografía a escala detallada de dichos procesos, y el primer mapa de geomorfología dinámica del CVLP.

1.3 Hipótesis

Las distintas unidades morfológicas controlan las tasas de erosión hídrica del suelo en el Complejo Volcánico La Primavera, mostrando que los factores más desfavorables y que

producen mayores tasas de pérdida de suelo son el tipo de material parental y la topografía de las unidades morfológicas.

1.4 Objetivos

General

Estimar la erosión hídrica de tipo laminar en los suelos del CVLP utilizando la ecuación RUSLE, con el fin de relacionar las tasas de pérdida de suelo con los principales rasgos morfológicos activos del paisaje.

Específicos

- a) Determinar los factores predominantes de los procesos erosivos hídricos.
- b) Evaluar la erosión hídrica real.
- c) Evaluar la erosión hídrica potencial.
- d) Generar un mapa de geomorfología dinámica a escala detallada.

2.1 Antecedentes

Desde un enfoque meramente geológico, existen numerosos trabajos enfocados en describir, interpretar y entender el yacimiento geotérmico de la zona, y que han estudiado la evolución geológica del complejo volcánico La Primavera. Mahood (1977 *et al.*, 1980, y 1983) propone las etapas de evolución del complejo y las primeras dataciones de las lavas por el método K-Ar. Además, realizó el estudio geoquímico de reconocimiento del área geotérmica y propuso un modelo del sistema geotérmico de La Primavera. Yokoyama & Mena (1991) a través de gravimetría y análisis de 13 núcleos de pozos de perforación propusieron que la estructura interna de la caldera de La Primavera está compuesta por dos depresiones en forma de embudo cuya profundidad es de entre 0.9 y 1.4 km, y que existe un basamento granítico a una profundidad aproximada de 3 km. Maciel-Flores & Rosas-Elguera (1992) presentaron la información resultante del análisis de 10 pozos perforados en el área de Cerritos Colorados obteniendo una columna litológica formada por un basamento granítico, andesitas, tobas líticas y riolitas; debido a que no se encontró metamorfismo entre el basamento granítico y la andesita, se sugirió que no tiene relación con la fuente de calor que soporta el yacimiento geotérmico. Finalmente, en este trabajo (Maciel-Flores & Rosas-Elguera, 1992), se evaluó la capacidad del yacimiento geotérmico, obteniendo una valuación aproximada de producción de 100 MW durante 17 años, capacidad similar a la del campo geotérmico Los Humeros, Puebla.

El trabajo de Rivera-Olguín (2016) expone resultados sobre la evolución del domo Planillas y del origen del depósito de avalancha al sur de este. Menciona que este depósito cubre un

área de 22 km², y que se encontraron bloques heterolitológicos de hasta 0.5 m con estructura de rompecabeza. Describe también una topografía de hummocks en la parte media del depósito, en los cuales pudieron observar una facie de mezcla de clastos asimilados en una matriz de arenas. Estas características son propias de este tipo de depósitos.

Por otra parte, Tinoco-Murillo (2017) propuso un mapa geológico del complejo LP en el que describe los cuatro episodios volcánicos principales: pre-caldera, sin-caldera, pos-caldera y extracaldera. Asimismo, propuso y argumentó acerca del origen de la mega pómez o Pómez Gigante, un horizonte marcador estratigráfico representativo en todo el sector centro de la caldera, cuya importancia recae en ser uno de los pocos ubicados en el mundo.

Recientemente, Almaguer *et al.* (2019) describieron la estructura caldérica y su sistema geotérmico mediante el uso de métodos geofísicos. Uno de ellos muestra la existencia de un cuerpo intrusivo debajo del arco sur de La Primavera, el cual podría ser responsable de la existencia de diques, fallamiento importante, cuerpos intrusivos masivos, y manifestaciones geotérmicas. Esto a través de un modelo 3D que integra datos aeromagnéticos, gravimétricos satelitales, gravimetría de superficie y estudios magnéticos. Por su parte, Bolós *et al.* (2019) estudiaron la circulación de fluidos y su relación con el sistema estructural mediante modelado o imágenes geofísicas, definiendo por primera vez zonas convectivas de los fluidos dentro del Campo Geotérmico Cerritos Colorados, al interior de la caldera. Otro trabajo reciente realizado por Sourisseau *et al.* (2020) muestra el estudio estratigráfico y geocronológico (²³⁰Th/ U) de la actividad pos-caldérica de La Primavera, el cual expone que al menos 14 erupciones ocurrieron posterior a la erupción del depósito de la Pómez Gigante, entre 86.4 y 26.8 miles de años, todas ellas con evidencia de una frecuente interacción magma-agua durante la evolución de la caldera.

Por otra parte, y relacionado a una de las problemáticas ambientales más grandes y que año con año deja desprovistos los suelos de La Primavera haciéndolos más susceptibles a la erosión hídrica, Huerta-Martínez e Ibarra-Montoya (2014) en su estudio de análisis espacial sobre incendios reportaron que más del 70% del área total fue afectada por este fenómeno desde 1998 a 2012. Entre los resultados calcularon que la tasa de pérdida anual de masa forestal fue del 1.31%; las localidades que sufrieron los incendios con mayor frecuencia son: Los Chorros de Tala, La Lobera, Agua Dulce, La Primavera, Las Tinajas y El Tecuán. Entre las principales causas destacaron la práctica agronómica de quema de cultivos de la caña de azúcar, la acumulación de material combustible que, sumado a condiciones ambientales de extrema sequía y fuertes vientos, derivó en incendios de grandes magnitudes.

Dentro de la también temática ambiental, Saucedo-Velázquez (2017) destacó la importancia de la conservación y el equilibrio ecológico de la zona, en conjunto con la explotación del recurso geotérmico del complejo La Primavera. Identificó los impactos negativos generados por el proyecto en su primera etapa, tales como pérdida de cubierta vegetal, erosión del suelo, y posible manejo inadecuado de los fluidos de perforación. El autor describe a los suelos con una escasa capacidad de formar agregados, por lo que afirma que son muy susceptibles a la degradación, y se basa en los datos de la CONANP-SEMARNAT (2000) para reportar dos grados de erosión en los suelos de La Primavera: 1) tasas menores a 10 t/ha en el 27% de la superficie y 2) tasas de hasta 50 t/ha en el 73% de la superficie.

Desde el punto de vista geomorfológico, Gómez-Álvarez (2015) propone un mapa con la cartografía de 10 dominios morfoestructurales, basándose en las características morfométricas básicas referidas a la extensión, altitud y patrón de drenaje de las diferentes unidades volcánicas de la caldera, los cuales buscan reflejar la relación estructural y tectónica

para cada uno de los diferentes episodios volcánicos del CVLP. Por otra parte, González-Torres *et al.* (2018) presentaron uno de los trabajos más recientes relacionados con la geomorfología del CVLP, el cual abarca el análisis de los procesos geológicos y geomorfológicos, su geodiversidad y el valor de esos sitios como patrimonio natural, las relaciones turístico-recreativas en La Primavera y su valor geológico para el desarrollo de geoturismo, así como, su estrecha relación con la ciudad de Guadalajara, y la complejidad territorial de la Sierra La Primavera, entre otros temas. Los autores presentaron un mapa geomorfológico el cual contempla nueve clasificaciones de las formas del relieve, donde a diferencia de Gómez-Álvarez (2015), contempla los procesos exógenos en su cartografía: a) precaldéricas, b) caldéricas, c) por procesos de resurgencia-erosión, d) por emisión de lavas (domos), e) en depresiones topográficas, f) por procesos erosivos, g) por colapsos gravitacionales y actividad freatomagmática, h) por sedimentación fluvial, e i) otros (lomeríos no diferenciados), además de marcar varios rasgos tectónicos.

En cuanto al estudio de la erosión hídrica existen dos trabajos que se realizaron con el fin de analizar la erosión hídrica del suelo del CVLP. Gómez-Martínez (1983) y Díaz-Maldonado (1983) aplicaron la ecuación determinística USLE. Cada autor se enfocó en calcular dos factores de la ecuación, y complementaron sus resultados para obtener una estimación de las tasas de erosión hídrica. Ambos autores obtuvieron resultados similares, y reportaron valores mínimos de pérdida de suelos entre 8.44 t/ha (Díaz-Maldonado, 1983) y 10 t/ha (Gómez-Martínez, 1983), y valores máximos entre 1500 t/ha (Gómez-Martínez, 1983) y 1596.61 t/ha (Díaz-Maldonado, 1983). El promedio de pérdida de suelo anual se estimó en 207.74 t/ha. Asimismo, los autores destacaron que el factor más importante para detonar la erosión fue la topografía.

2.2 Marco teórico

2.2.1 Erosión hídrica

La erosión hídrica es un fenómeno compuesto de dos procesos que consisten en el desprendimiento de las partículas del suelo y su transporte por el agente erosivo, que en este caso es el agua (Figueroa *et al.*, 1991).

Existen diferentes tipos de erosión hídrica, en este estudio se evaluará el tipo de erosión laminar o difusa. Este ocurre cuando se sobrepasa la velocidad de infiltración o el suelo se satura totalmente. Se presenta en forma de pequeños hilillos de agua que no se llegan a concentrar con una profundidad máxima de 1-2 cm. El efecto que produce es la pérdida gradual de la parte más superficial de suelo, aunque no es uniforme ya que depende de la cubierta vegetal, la hojarasca y el estrato herbáceo. Las evidencias de la erosión laminar son pedregosidad superficial del suelo, exhumación de raíces, superficie moteada del suelo con colores claros y acumulación de hojarasca en forma de represas.

La erosión hídrica puede suscitarse de dos maneras: natural o geológica, y antrópica o acelerada. La primera se refiere al equilibrio dinámico entre los procesos de desgaste y los procesos de formación del nuevo suelo. La segunda es propiciada de manera directa o indirecta por acción del hombre, y se presenta al romper el equilibrio dinámico del ecosistema natural. Los factores que intervienen en el proceso denudativo son: la intensidad y frecuencia de las lluvias, la inclinación y longitud de la pendiente, la cobertura vegetal, el tipo de suelo, y el uso y manejo del suelo.

2.2.2 Ecuación RUSLE

La ecuación RUSLE, Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada, por sus siglas en inglés (Renard, 1997) es una herramienta para estimar cuantitativamente la erosión hídrica (de tipo laminar) en el suelo, es una ecuación derivada y mejorada de su antecesora USLE, que fue propuesta por Wischmeier & Smith (1965). En la actualidad existe variedad de métodos directos (clavos y rondanas, transecto de cárcavas, trampas de erosión, perfiles de suelos, etc.) e indirectos (USLE, RUSLE3D, USPED, comparación de imágenes satelitales, etc.) para estimar la erosión hídrica en cuencas, sin embargo, por la practicidad y relativamente fácil accesibilidad de los insumos, la ecuación RUSLE se ha consolidado como herramienta de planificación de conservación de suelos más utilizada a nivel mundial.

La ecuación RUSLE consiste en la determinación y valoración de varios factores que intervienen en el proceso de erosión laminar, tales como la erosividad de la lluvia, la erodabilidad del suelo, la topografía, la cobertura vegetal y las prácticas de manejo, con la finalidad de estimar de manera cuantitativa la pérdida de suelo. Estos factores se representan en la ecuación:

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

Donde:

A= pérdida estimada promedio de suelo en t/ha.

R= factor de erosividad de la lluvia (MJ*mm/ ha/hr).

K= factor de erodabilidad del suelo (t*ha*hr/ MJ*mm*ha).

LS= factores de longitud (L) e inclinación de la pendiente (S) (adimensionales).

C= factor de manejo de cultivos (adimensional).

P= factor de prácticas mecánicas de control de erosión (adimensional).

Factor R

Este factor estima la energía cinética de la lluvia necesaria para remover y transportar las partículas de suelo. El fundamento teórico es que al caer las gotas de lluvia primero mojan el suelo y después remueven las partículas. Cuando la precipitación excede la capacidad de infiltración del suelo se presenta el escurrimiento superficial, el cual también tiene la habilidad de remover y transportar las partículas de suelo (Osti *et al.*, 2007).

Factor K

Este factor representa la susceptibilidad de un suelo a ser erosionado. Entre las opciones para calcular el factor K se encuentra el nomograma de Wischmeier *et al.* (1971) citado en Figueroa *et al.* (1991) que permite evaluar este factor utilizando cuatro parámetros: textura, contenido de materia orgánica, estructura y permeabilidad.

Factor LS

La longitud de la pendiente queda definida como la distancia desde el punto de origen del flujo hasta cualquiera de los siguientes puntos: i) punto donde la pendiente decrece de tal manera que comienza a existir la sedimentación, o ii) el punto donde el agua de escorrentía se une con un canal bien definido parte de una red de drenaje o un canal construido. La inclinación de la pendiente tiene mayor influencia, ya que la pérdida de suelo aumenta más rápidamente con la inclinación que con la longitud (Figueroa *et al.*, 1991).

Factor C

Este factor incluye el efecto combinado de las variables de manejo y cobertura. El valor de C depende de la combinación entre cobertura, secuencia de cultivos y prácticas de manejo de un lugar en particular. También depende del estado de crecimiento y desarrollo de la cobertura vegetal (Figuroa *et al.*, 1991).

Factor P

Se refiere a las prácticas de conservación en el terreno. Las prácticas como el surcado al contorno, el cultivo en fajas al contorno y los sistemas de terrazas son las más importantes al momento de implementar prácticas mecánicas de conservación.

2.2.3 Ecuaciones para estimar la erosión (USLE/ RUSLE) y los SIG

Aunque originalmente la ecuación RUSLE fue desarrollada para emplearse en parcelas agrícolas con condiciones uniformes (Wischmeier & Smith, 1965), los Sistemas de Información Geográfica (SIG) permiten adaptarla a grandes extensiones de terreno o cuencas. A continuación, se presentan algunos casos relevantes:

Moges & Bhat (2017) utilizaron el modelo RUSLE en conjunto con tecnologías geoespaciales para analizar el impacto del cambio de uso de suelo y la cobertura en una región de tierras altas al NW de Etiopia de 1986 al 2016. Los autores observaron un notable aumento en la tasa anual de erosión en toda la cuenca, de 40 t/ha*año en 1986 a 68 t/ha*año

en 2016. La integración de métodos les permitió identificar zonas de alta erosión y áreas prioritarias de conservación a nivel local y regional.

Singh & Panda (2017) utilizaron la ecuación USLE y los SIG para evaluar a partir de celdas de 100 m por 100 m el potencial de erosión en la cuenca de Kapgari, India, y así identificar zonas propensas a erosión crítica. Según los autores, esta distribución espacial de celdas para estudiar cuencas y subcuencas hidrográficas es útil para gestionar diversos escenarios y como guía para proponer políticas de recomendación y prevención de la erosión, así como medidas de control en otras zonas con condiciones similares.

En México, también se ha hecho uso de la ecuación RUSLE en combinación con los Sistemas de Información Geográfica (SIG) de manera extensa. Pando-Moreno *et al.* (2003) realizan un estudio para comparar un método directo (clavos y rondanas) y uno indirecto (RUSLE & Arc-View) para la estimación de la erosión hídrica en una microcuenca del estado de Nuevo León. Encontraron que los resultados del método indirecto son bastante precisos en comparación con el método directo, pero que tiende a subestimar los valores en zonas con cárcavas.

Nájera-González *et al.* (2016), realizaron un estudio en el que analizan el riesgo de erosión hídrica y estiman la pérdida de suelo en paisajes geomorfológicos volcánicos de México, para ello utilizaron la ecuación RUSLE con apoyo de un SIG. Esto les permitió analizar un área de 618 km², la cuenca de Mololoa en el estado de Nayarit. Delimitaron 15 ambientes morfogenéticos dentro de la cuenca, y se aplicó la ecuación RUSLE a cada uno. Los resultados mostraron riesgos de erosión desde muy alta (>50 t/ha*año) a moderada (10 t/ha*año).

3. Materiales y métodos

3.1 Área de estudio

El Complejo Volcánico de La Primavera (CVLP) ocupa un área de aproximadamente 379 km², donde se incluyen los rasgos y estructuras geomorfológicas más relevantes relacionadas a la evolución de este complejo, y no sólo el polígono del Área Natural Protegida establecida en el Diario Oficial de la Federación y mostrada por la CONANP-SEMARNAT en el año 2000. El CVLP se localiza al Oeste de la ciudad de Guadalajara, Jalisco, México, entre las coordenadas 103°28' a 103°42' longitud oeste, y 20°32' a 20°44' latitud norte, con un rango de altitud que varía de 1340 a 2272 msnm (Figura 4).

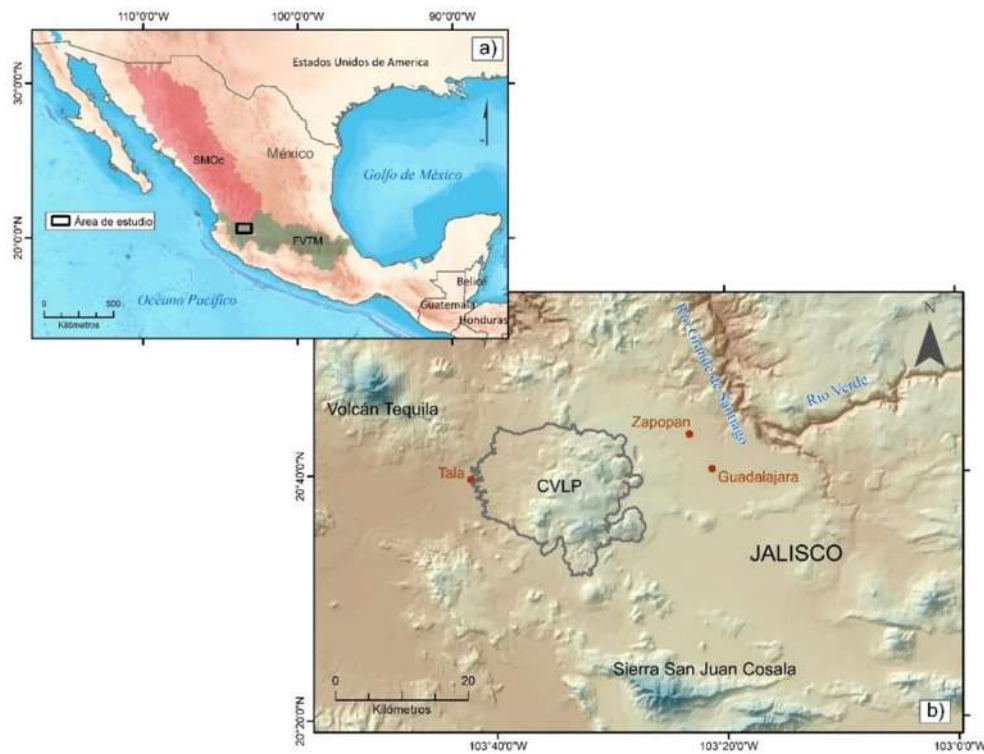


Figura 4. Mapa de localización del CVLP. a) Ubicación de la zona de estudio dentro de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) y Sierra Madre Occidental (SMOc). b) Rasgos topográficos

más importantes en el contexto regional, y algunas estructuras geológicas relevantes como el volcán Tequila y la Sierra San Juan Cosala. Sistema de coordenadas: GCS WGS 1984.

Clima

Según la clasificación climática de Köppen (García & CONABIO, 1998), los climas predominantes en el CVLP son templado subhúmedo C(w1) y semicálido subhúmedo (A)C(w1), ambos con lluvias en verano e invierno con precipitaciones anuales que fluctúan entre 800 y 1,000 mm, considerando que las precipitaciones invernales representan únicamente el 5% de la precipitación total. Por sus características torrenciales, el 77% de las lluvias se consideran de tipo erosivo. Por lo general el periodo de lluvia comienza en el mes de mayo y termina en octubre (CONANP-SEMARNAT, 2000) (Figura 5).

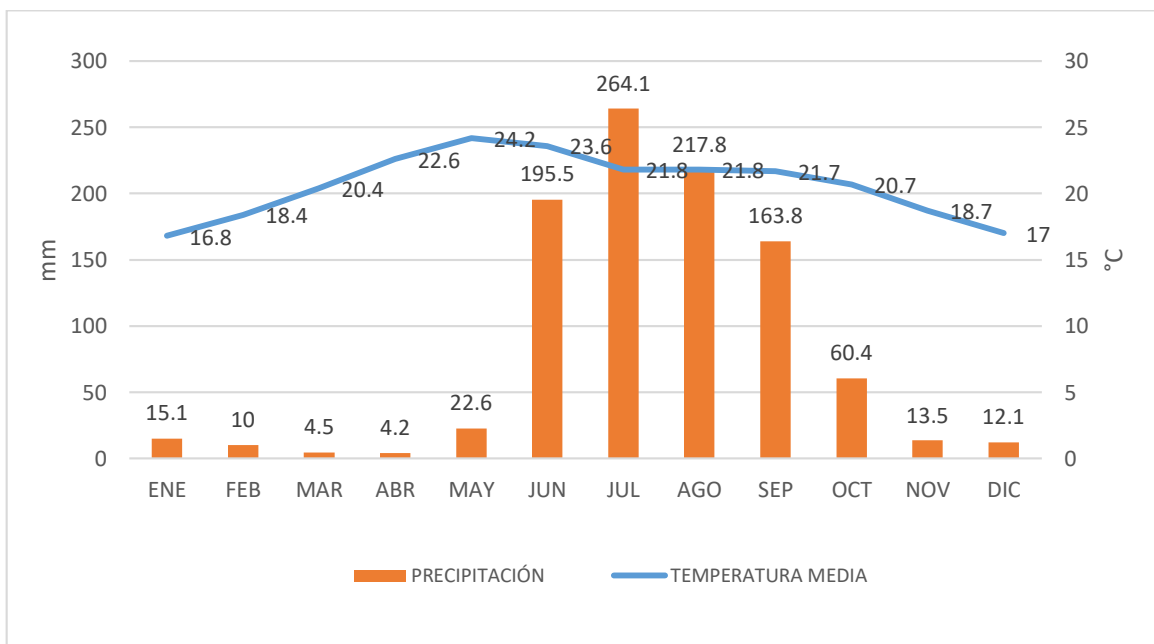


Figura 5. Climograma de la estación meteorológica de Zapopan, cercana al CVLP, que muestra el temporal de lluvias que inicia en el mes de junio y se puede extender hasta el mes de octubre, siendo el mes de mayo que en promedio presenta la mayor temperatura y enero la menor (CONAGUA, 2021).

Vegetación

De acuerdo con la CONANP-SEMARNAT (2000) y la clasificación de Rzedowski (2006) se encuentran cuatro tipos de vegetación dentro del CVLP: bosque de encino (*Quercus*); bosque de encino-pino (*Quercus-Pinus*); bosque de pino (*Pinus*) y bosque tropical caducifolio (Figuras 6 y 7), así como tres comunidades vegetales, riparia, rupícola y ruderal, que se desarrollan dentro de los diferentes tipos de vegetación antes mencionados.



Figura 6. Bosque de encino sobre las faldas del domo Cerro Alto. Tomada en abril de 2018.

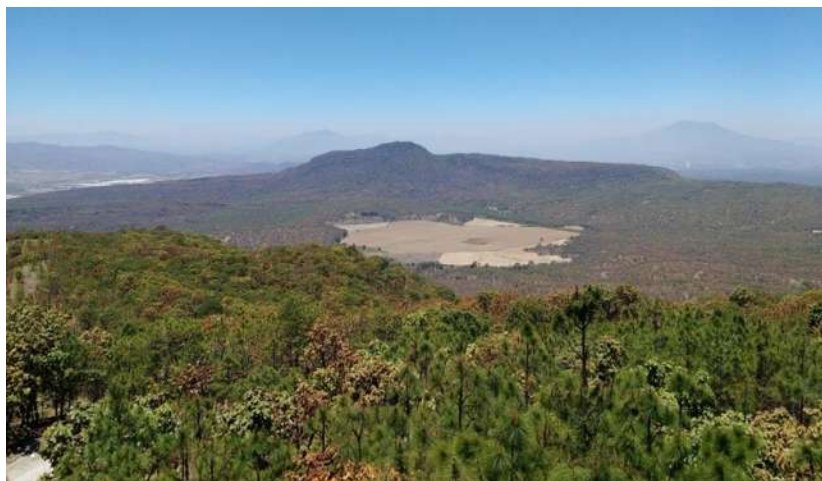


Figura 7. Vista panorámica de la vegetación del CVLP tomada desde el domo Las Planillas, se observa mayormente un bosque de pino/encino, con una zona agrícola en la parte baja, al fondo el domo San Miguel. Tomada en abril de 2018.

INEGI en su carta de uso de suelo y vegetación (2013) propone las siguientes categorías de cubierta vegetal y uso de suelo (Figura 8), a partir de la cual se obtuvieron los siguientes porcentajes de cobertura:

Tabla 1. Porcentajes de área ocupada por los diferentes tipos de cobertura vegetal y uso de suelo (INEGI, 2013).

Tipo de cobertura vegetal y uso de suelo	Área ocupada (km ²)	%
Bosque de encino	244.68	64.54
Bosque de coníferas (pino)	53.76	14.18
Agrícola-Pecuaría-Forestal	40.95	10.80
Vegetación inducida	27.36	7.21
Zona urbana	12.29	3.24
Totales	379.06	100.00

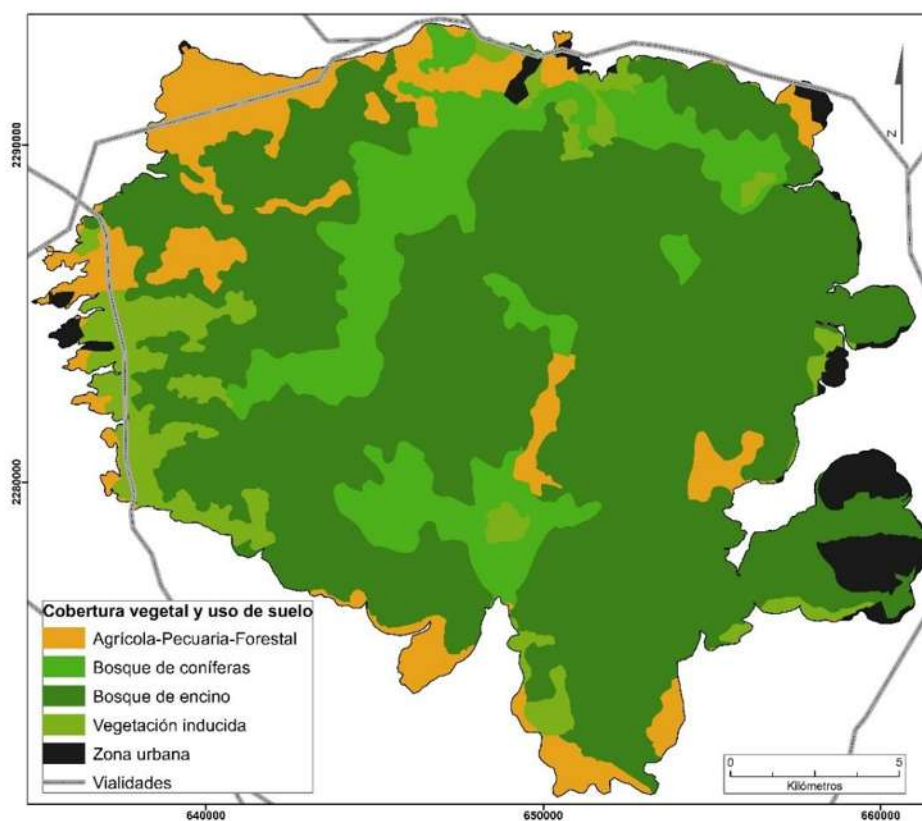


Figura 8. Cobertura vegetal y uso de suelo del CVLP basado en el INEGI (2013) e imágenes satelitales (Google Earth, 2019). Sistema de coordenadas: UTM WGS84 Zona 13N.

Suelos

De acuerdo con el INEGI (2013) los suelos predominantes son Phaeozems (95% de la superficie) y, en segundo lugar, Regosoles (5%). Los Phaeozems presentan un horizonte superficial oscuro, rico en humus, y son suelos porosos, fértiles y excelentes tierras de cultivo, aunque la erosión hídrica es un peligro grave en ellos (FAO, 2015).

Los Regosoles son suelos poco desarrollados de materiales no consolidados. Su material parental suele ser de grano fino. Cuando la precipitación excede los 750 mm/ año, el perfil logra su capacidad de retención de humedad a principios de la temporada de lluvias. Los Regosoles en regiones montañosas son frágiles y es mejor conservarlos bajo bosque (FAO, 2015).

Hidrografía

Cuatro subcuencas componen la red hidrográfica del CVLP: Corona-Río Verde, L. San Marcos, Río Salado y Río Verde-Santa Rosa (INEGI, 2010). Estas subcuencas suman en total 1076.72 km de drenajes intermitentes y perennes dentro del polígono de estudio, de los cuales los más importantes debido a su madurez y características son: el Río Caliente, este afluente perenne fluye desde la parte central de la caldera hasta su salida al Oeste del complejo donde se convierte en el Río Salado, es alimentado por los escurrimientos del Gallo y Arena Grande así como por los manantiales hidrotermales que le dan su característica más distintiva: una temperatura de 70 a 80°C. De acuerdo con la clasificación jerárquica de Strahler (1952) esta corriente es de orden 5, la única y más alta de todo el complejo. Los ríos Las Tortugas localizado al límite norte del complejo, Arroyo Grande al Este, La Villita, Agua Caliente y Saucillo al Sur, El Taray al Sur-Oeste, y Las Animas al Oeste, son corrientes de cuarto y

tercer orden y considerados de actividad intermitente, pero importantes en la alimentación hídrica de las subcuencas (Figura 9).

La densidad de drenajes o corrientes en el CVLP es de 1.81 por km² en rocas riolíticas (unidades de flujo de lava) y de 2.3 por km² en pómez y toba (secuencias piroclásticas). Dentro del CVLP se han cartografiado un total de 35 manantiales y 64 norias, en su mayoría de agua caliente (CONANP-SEMARNAT, 2000).

De manera general, los principales patrones de drenaje que se observan dentro del polígono de estudio son: dendrítico, subparalelo y radial, aunque también se pueden observar rasgos de un patrón rectangular o angulado, relacionado a fallamiento local.

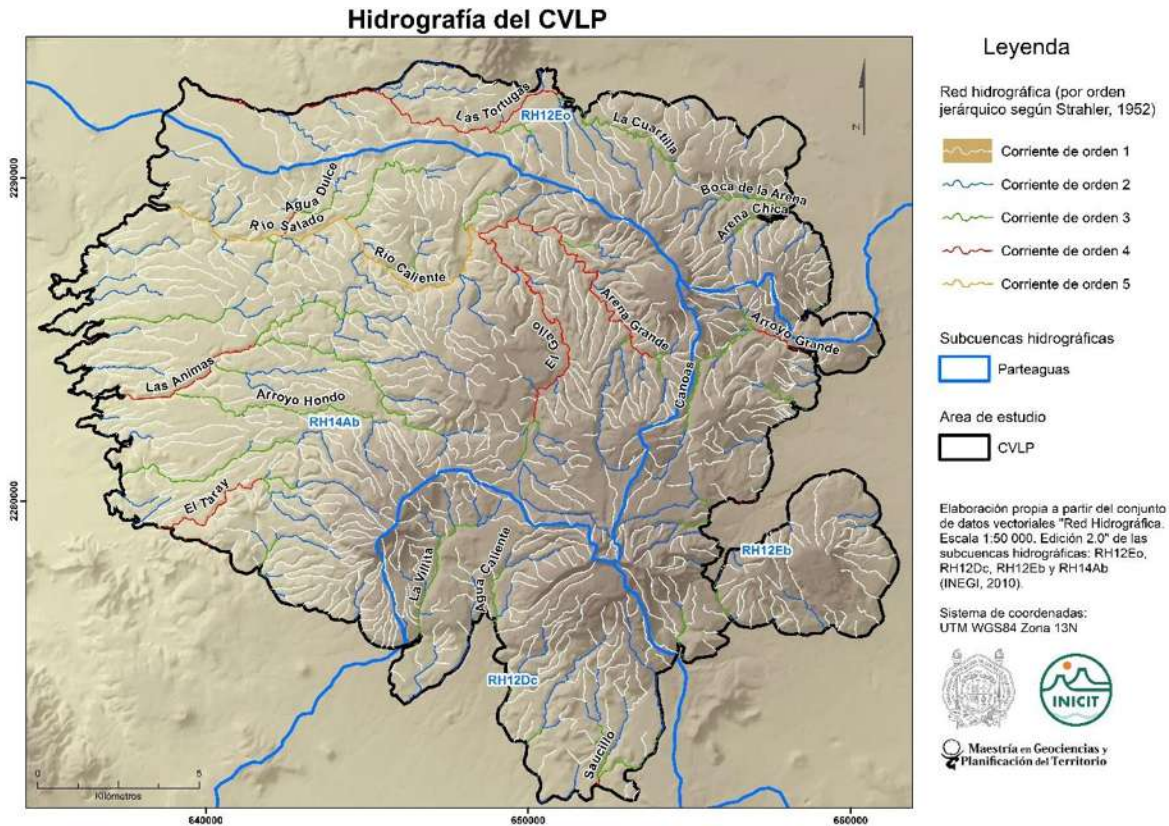


Figura 9. Mapa hidrográfico del CVLP donde se aprecian las cuatro subcuencas que lo conforman: R. Verde-P. Santa Rosa (RH12Eo), Río Salado (RH14Ab), R. Corona-R. Verde (RH12Eb) y Laguna San Marcos (RH12Dc); así como los ríos más importantes dentro del complejo.

3.2 Morfometría

Los diferentes modelos morfométricos utilizados para el análisis morfológico fueron obtenidos a partir del modelo digital de elevación del terreno de INEGI con una resolución de 15 m. Se describen a continuación los más relevantes.

Inclinación de la pendiente

De manera general el relieve del CVLP se caracteriza por ser suave, sin zonas demasiado agrestes o escarpadas, con pendientes predominantes que van desde 0 a 10°, distinguibles en las unidades de flujo (domos, mantos y coladas de lava) así como las secuencias piroclásticas

(flujos piroclásticos), aunque en realidad se encuentran en todo el complejo (Figura 10). La segunda predominancia son pendientes que van de 10 a 30° donde la inclinación es considerable (mediana a fuertemente inclinada), éstas se localizan generalmente en los lomeríos (Figura 12) y pie de montes de las unidades de flujo, la zona centro sur de los depósitos vulcano-lacustres norte, y en general, cualquier diferencia de altura está regida por pendientes de estos rangos (Figura 11). Las pendientes de 30 a 45° (muy fuertemente inclinadas) se localizan predominantemente en los lóbulos frontales (o frentes de flujo) de los domos, coladas y mantos de lava, así como en algunas de las barrancas y cárcavas; las pendientes >45° son casi inexistentes, pero se llegan a observar en algunas laderas de los domos.

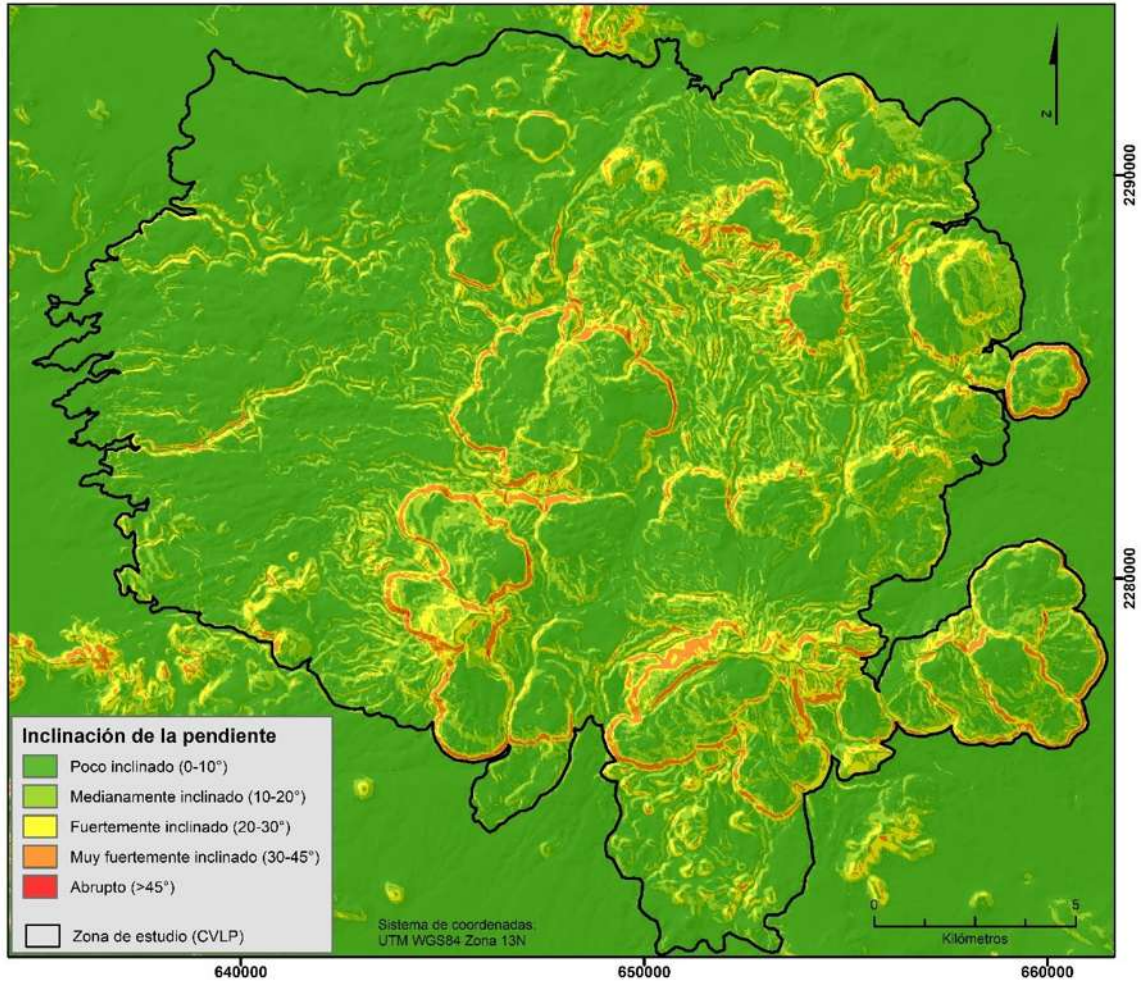


Figura 10. Modelo de inclinación de la pendiente en grados. Se observan claramente los límites de las unidades morfológicas propuestas en la Figura 22. Clasificación con base en Priego-Santander *et al.* (2010).

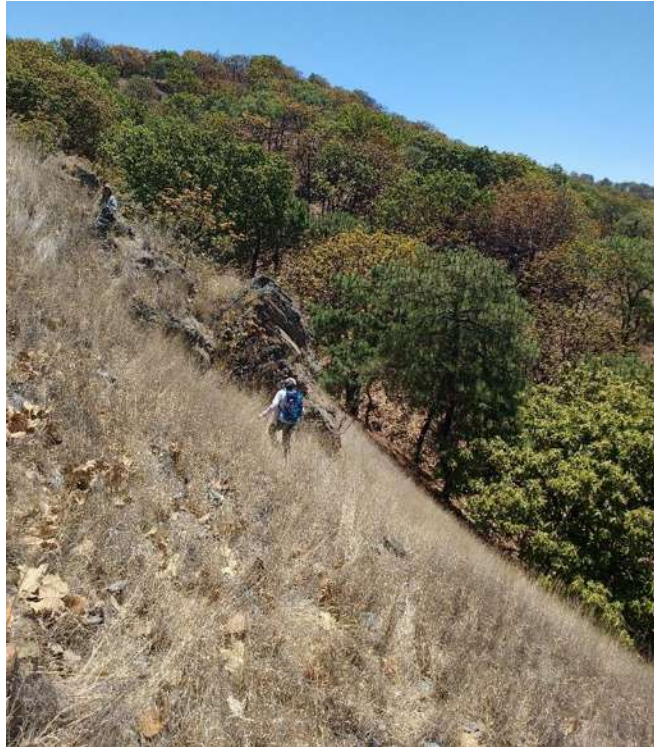


Figura 11. Ejemplo del grado de inclinación de algunas laderas. Tomada en el domo Pedernal en abril de 2018.

Amplitud del relieve

Los valores de amplitud o disección vertical en el CVLP varían desde 9 m/0.5 km² hasta 340 m/0.5 km² (Figura 12), presentado relieves desde planicies onduladas hasta montañas de acuerdo con la clasificación de Priego *et al.* (2008).

Las zonas con planicies onduladas (2.6<15 m/0.5 km²) tienen prácticamente nula representación dentro del complejo volcánico, solamente figuran como pequeñas áreas casi planas, pero la mayoría se localizan a las afueras de éste. La tercera clase, que corresponde a las planicies acolinadas (16-<40 m/0.5 km²) se encuentran reflejadas principalmente en la unidad de flujos piroclásticos al W y en algunos sectores norte y centro sur de las secuencias piroclásticas. Los lomeríos (41-<100 m/0.5 km²) son una de las clases predominantes dentro del CVLP y con mayor distribución, prácticamente tienen representación en todas las

unidades morfológicas, aunque destacan por ejemplo las secuencias vulcano-lacustres norte y sur, el domo Pedernal y el depósito de avalancha. Las zonas de montaña ($Dv \geq 100$) se presentan en prácticamente todas las unidades de flujo (domos, coladas y mantos de lava) y en el vulcanismo externo, esta clasificación se relaciona con las zonas más altas y con las zonas donde la diferencia de altura/área es más importante.

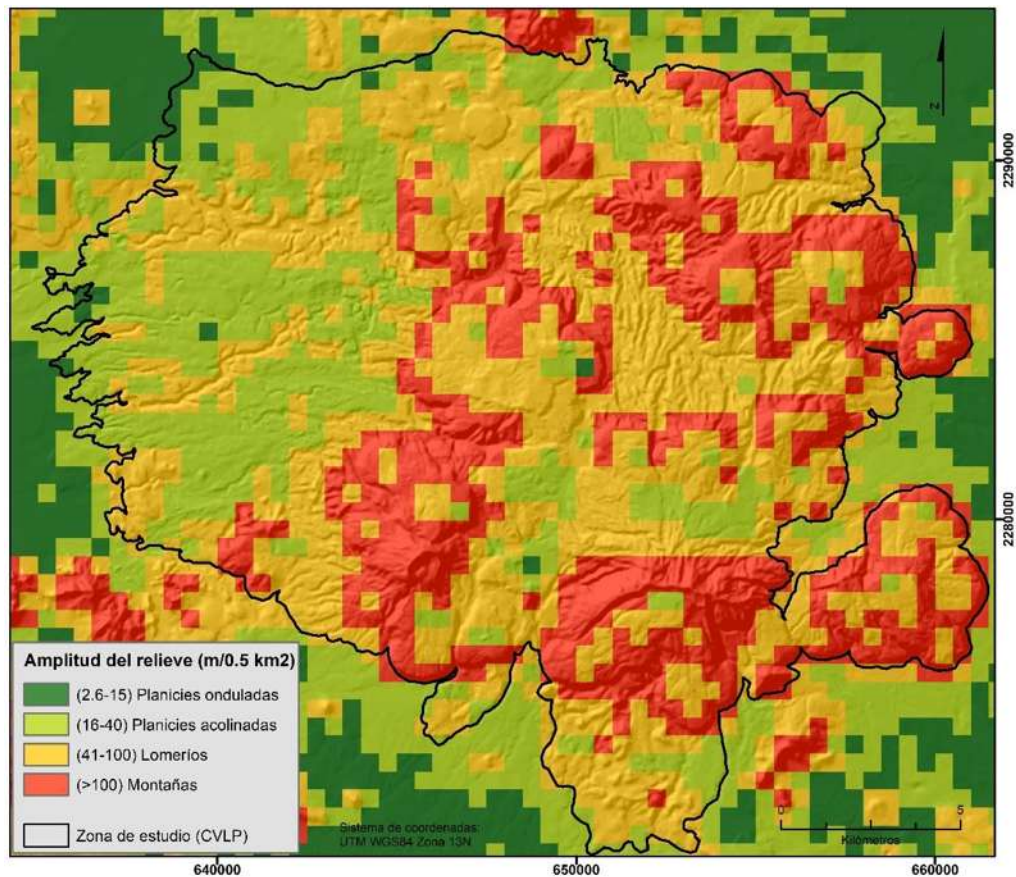


Figura 12. Modelo de amplitud del terreno con diferencia de altitud por cada 500 m², la clasificación de unidades del paisaje fue con base en Priego *et al.* (2008). * Dentro del área de estudio no figuran valores menores o iguales a 2.5 m/0.5 km².

Rugosidad del terreno

La delimitación de unidades morfológicas y rasgos estructurales refleja los cambios de orientación y pendiente del terreno, considerando que entre mayor sea la variación entre estos dos factores mayor es su rugosidad (Hobson, 1967, 1972). En la Figura 13 se observa como este modelo resalta claramente el límite de las unidades morfológicas del complejo, así como también la dirección de flujo de estas, las zonas fluviales mayores, e incluso los depósitos aluviales en los límites externos del complejo.

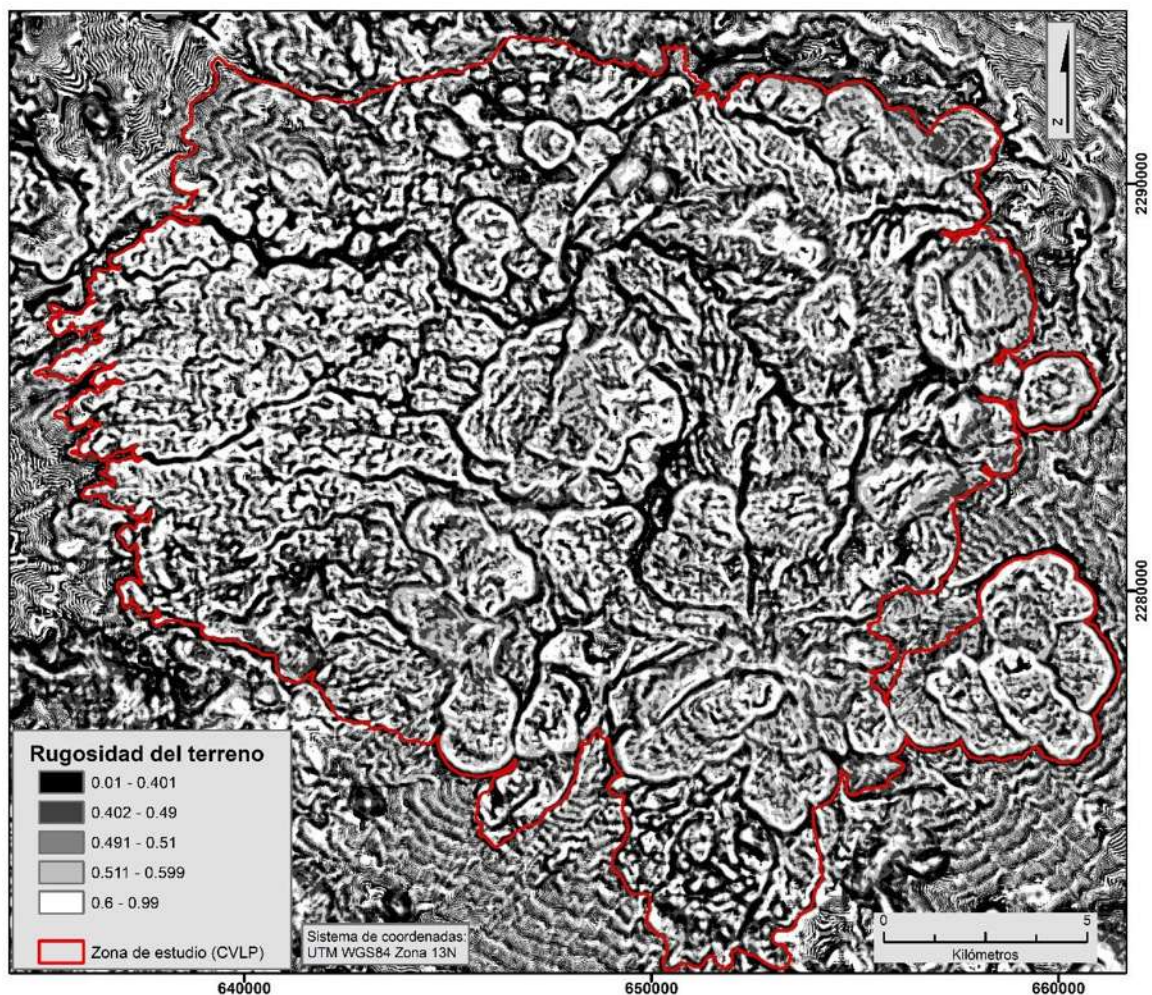


Figura 13. Modelo de rugosidad del terreno, basado en Hobson (1967, 1972). Las zonas más oscuras corresponden a las más homogéneas topográficamente, y donde hay más variabilidad de grises y blancos la topografía es más heterogénea.

3.3 Marco Geológico

3.3.1 Marco geológico-tectónico regional

El CVLP se encuentra en la transición entre dos provincias fisiográficas: la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) en su sector occidental y la Sierra Madre Occidental (SMOc) en su sector sur. En esta región, tectónicamente ocurre la llamada “junta triple de grieta continental” o “Punto Triple” (Aguirre-Díaz, 1996; Ferrari, 2000; Wallace *et al.*, 1992; Rosas-Elguera *et al.*, 1996) en la cual el Bloque Jalisco, que es un fragmento semidesprendido de la placa Norteamericana, se encuentra inmerso en el triángulo donde la placa de Norteamérica choca con las de Rivera y Cocos, dando lugar a la convergencia del Rift de Colima (de dirección N-S), el Graben de Chapala (E-W) y el Rift Tepic-Zacoalco (NW-SE) (Luhr & Lazaar., 1985) (Figura 14). El límite norte del Bloque Jalisco (referente al Rift Tepic-Zacoalco) es aproximadamente paralelo a la barranca del Río Grande de Santiago (Figura 4) por lo cual la ubicación y origen del CVLP están íntimamente relacionadas a ese límite y a su inestabilidad inherente, donde ocurre deformación extensiva y el vulcanismo peralcalino propio del complejo, así como un gran número de fallas normales y grabens en toda el área (Bolós *et al.*, 2019). Estudios como el de Ferrari *et al.* (1997; 1999) y Rossoti *et al.* (2002) coinciden con esta ubicación. Otros ejemplos de importancia (por su extensión y evolución) de actividad volcánica dentro del Bloque Jalisco son: la caldera de San Pedro Lagunillas fechada aparentemente hacia el Pleistoceno medio (45-50 000 años) y que es significativamente parecida a la caldera del CVLP; el volcán/caldera de Tepetitlic de aproximadamente la misma fecha que San Pedro Lagunillas, ubicado a unos 135 km al NW del complejo; el estrato volcán Ceboruco, que registró sus últimas erupciones entre 1870 y

1875; así como conos cineríticos cuyos productos suelen ser lapilli y bombas (Weigand, 2012).

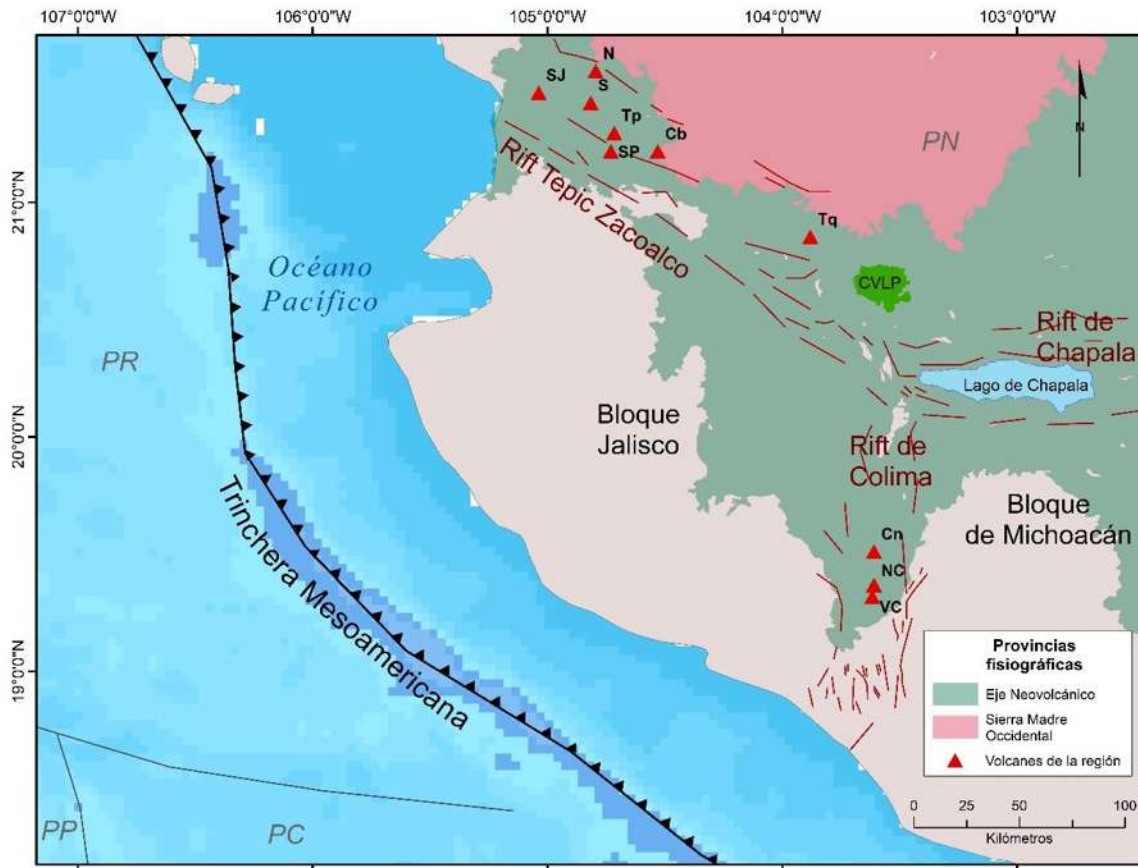


Figura 14. Mapa del marco tectónico-geológico regional. Se muestra la localización del CVLP dentro de las provincias fisiográficas del Eje Neovolcánico y la Sierra Madre Occidental, así como dentro de la dinámica tectónica del Bloque Jalisco (Modificado de Bolós *et al.*, 2019). VC, Volcán de Colima; NC, Nevado de Colima; Cn, Cantaro; Tq, Tequila; Cb, Ceboruco; SP, San Pedro; Tp, Tepetitlic; S, Sanganguey; N, Navajas; SJ, San Juan; CVLP, Complejo Volcánico La Primavera; PN, Placa Norteamericana; PP, Placa del Pacífico; PC, Placa de Cocos. Sistema de coordenadas: GCS WGS 1984.

3.3.2 Evolución geológica del CVLP

La evolución geológica del CVLP abarca un periodo de tiempo de los 120 ka hasta 20 ka aproximadamente (Mahood, 1980), lo que hace a este complejo la manifestación riolítica

más reciente y compleja de toda la provincia de la Franja Volcánica Transmexicana (Huerta-Martínez & Ibarra-Montoya, 2014).

Estratigráficamente el CVLP se compone de un basamento regional intrusivo granítico que data del Mioceno Tardío, por encima de éste se ha reportado evidencia de que el basamento local está compuesto por un potente cuerpo de composición andesítica, sobre éste descansa un paquete piroclástico dividido por un delgado flujo andesítico, y finalmente en la cima del periodo pre caldera se han encontrado rocas riolíticas, posiblemente de edad Cuaternaria y que podrían corresponder con las primeras emisiones relacionadas con la formación de la caldera

(Figura 15).

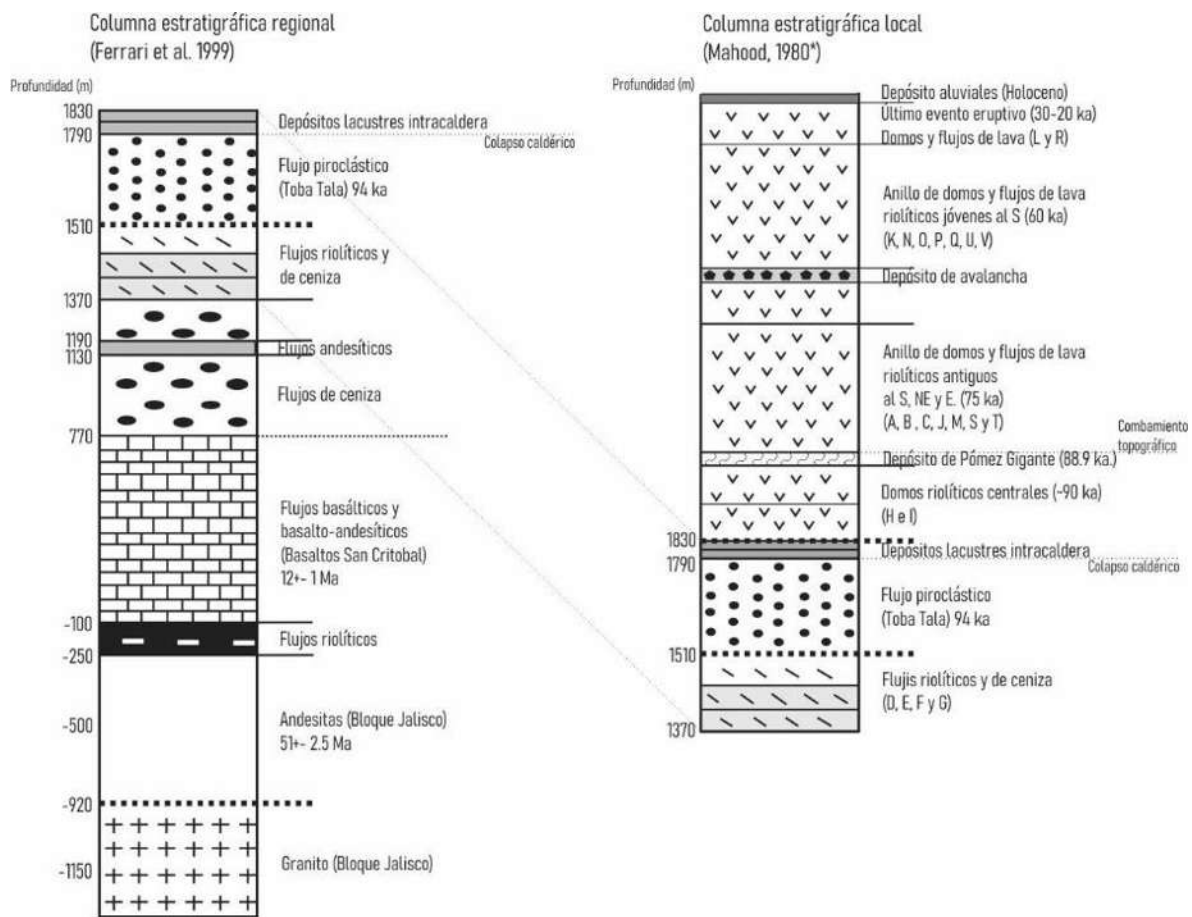


Figura 15. Columnas estratigráficas generales. *La columna local se basó en la secuencia propuesta

por Mahood, sin embargo, se propone que el depósito de avalancha ocurrió durante la evolución del domo Q (Planilla) y no a un evento precaldera como se ha mencionado en algunos trabajos (Mahood, 1980; Maciel-Flores & Rosas-Elguera, 1992). La datación del paleolago corresponde al trabajo de Dorantes-Zavaleta (2018).

En el contexto geológico local se tomó como base lo propuesto por Mahood (1980), aunque también se correlacionó con lo mencionado por otros autores (Figura 19) y observaciones propias. Cabe mencionar que las unidades mencionadas en este subcapítulo, hacen referencia a las unidades morfológicas definidas en el mapa de morfodinámica (Figura 22). A continuación, se describen cuatro etapas importantes en la evolución del CVLP que incluyen varios eventos:

i) Vulcanismo externo y pre-caldera. Previo al primer evento del CVLP, se han cartografiado en el área algunos cuerpos volcánicos morfológicamente distintos al resto de las unidades, que fueron clasificados como andesitas Miocénicas (Maciel-Flores & Rosas-Elguera, 1992) con una edad aproximada de 150 ka (Tinoco-Murillo, 2017). El primer evento del CVLP data de hace 120 ka aproximadamente con el abombamiento regional que generó zonas con fallamientos arqueados, y por donde comenzó la emisión de los primeros flujos de composición riolítica al NW del actual complejo. En nuestras unidades morfológicas, esta etapa es representada por los domos Burro, El Chato, León y Río Salado (D, E, F y G, respectivamente; Figura 22).

ii) Etapa sin-caldera. Inicia hace 95 ka (aprox.), cuando se generan las primeras erupciones explosivas y con ello la emisión de unos 45 km³ de flujos piroclásticos (Mahood, 1980) (la Toba Tala) que cubrieron un área estimada de 700 km² (Wright, 1981) con una profundidad

variable (~280 m). Esta unidad se caracteriza por tener una estructura masiva y ser altamente permeable, además de exhibir chimeneas fósiles resultado de procesos de enfriamiento (Fig. 16) (González-Torreros, *et al.* 2018). Estas erupciones provocaron el vaciamiento de la cámara magmática y por ende el colapso del techo de esta, creando una depresión topográfica de unos 11 km de diámetro. Dentro de esta misma etapa y posterior al colapso de la caldera se formó un lago intra-caldera que data del Pleistoceno y que tuvo un periodo evolutivo de ~11 ka, en los cuales se registraron además de los depósitos lacustres, depósitos de caída, cenizas y un estrato denominado Pómez Gigante (Figura 17), el cual interrumpe el desarrollo del lago hace 89.9 ka (Dorantes-Zavaleta, 2018). Este depósito se ha convertido en un marcador estratigráfico claro en toda la secuencia vulcano-lacustre (Tinoco-Murillo, 2017). La emisión de la Pómez Gigante se dio a partir del origen de los domos riolíticos centrales (H e I, Cerro Alto y Nejahuete, respectivamente) que se formaron simultáneos al lago, y ocasionaron el fraccionamiento de éste en un lago norte y uno sur. El lago norte desarrolló una sedimentación fluviodeltaica con un aporte volcanoclástico menor al cuerpo sur, y para su etapa final de desarrollo la sedimentación fue mayoritaria en arenas y cenizas intercaladas. Por otra parte, en el lago sur los sedimentos limoarcillosos sugieren un lago más estable, hasta su interrupción por un sistema fluvial de mayor energía, y posteriormente cambió a uno de menor intensidad (Dorantes-Zavaleta, 2018). Evidencia de la actividad tectónica quedó registrada en los depósitos lacustres en forma de sismitas (Figura 18). Al final de esta etapa geoevolutiva ocurre un levantamiento topográfico de los sedimentos vulcano-lacustres a causa de una realimentación de la cámara magmática, causando la definitiva desaparición del paleolago hace ~79 ka. Ambas secuencias vulcano-lacustres son coronadas por un depósito de tefra, relacionado a la siguiente etapa eruptiva del complejo.

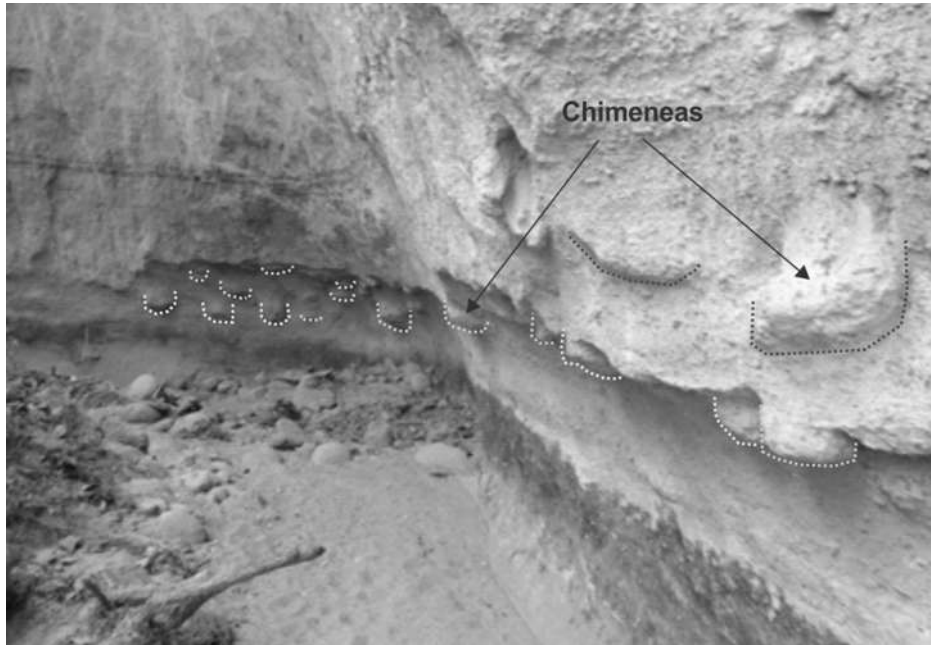


Figura 16. Corte estratigráfico en una de las barrancas dentro del depósito de la toba Tala, en la base se aprecian las chimeneas características de esta unidad. Tomada en abril de 2018.

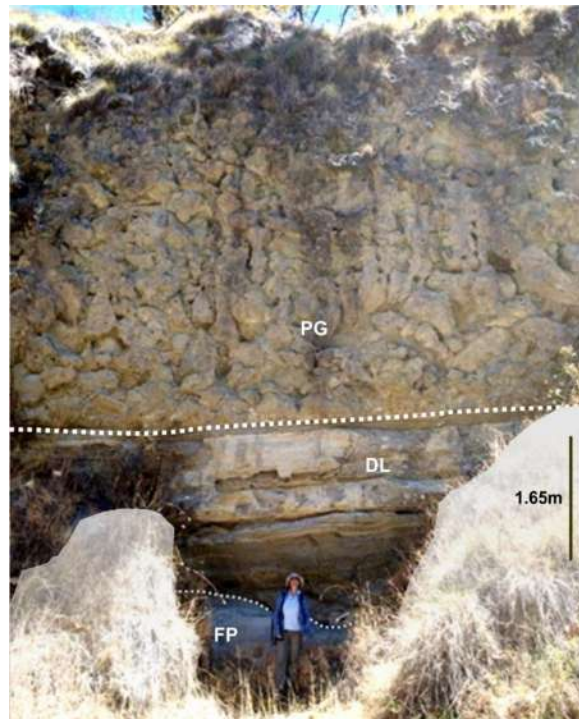


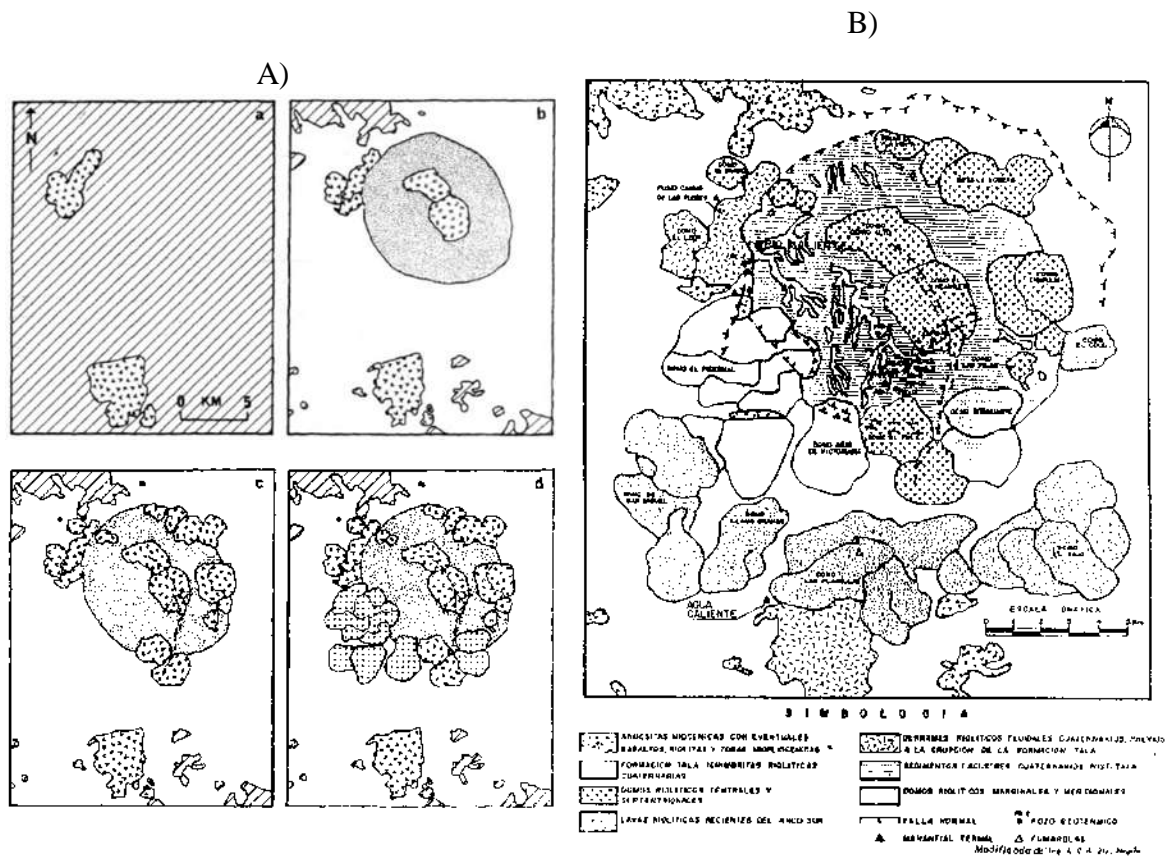
Figura 17. Secuencia vulcano-lacustre: PG, Depósito de la Pómez Gigante; DL, Depósitos lacustres; y FP, Flujos piroclásticos (Toba Tala). La Dra. Lourdes como escala, tomada en abril de 2018.



Figura 18. El Dr. Víctor H. Garduño[†] explicando el comportamiento de las microfallas que afectaron los sedimentos lacustres, en corte de la secuencia vulcano-lacustre en la porción del lago Norte. Tomada en julio de 2016.

iii) Etapa post-caldérica. Durante este periodo ocurren dos etapas de eventos eruptivos producto de la realimentación de la cámara magmática. El primero da origen al anillo de domos y flujos de lava antiguos (A, B, C, J, M, S, y T), ubicados al S, E y NE del complejo, emitidos a través de las fracturas arqueadas previas, esto ocurre hace aproximadamente 79 ka. El segundo evento da origen al anillo joven de domos y flujos de lava riolíticos al sur del complejo (K, N, O, P, Q, U y V) hace ~60 ka.

iv) El último evento eruptivo fue hace 30-20 ka, concluyendo así la evolución del CVLP, en éste se originan los domos del Tajo al SE, y el Coli al E, siendo las unidades de flujo más recientes. Coronando la columna estratigráfica, están los depósitos aluviales que continúan en formación hasta nuestros días.



3.3.3 Geomorfología

El CVLP ha sido agrupado en cinco unidades morfológicas principales: vulcanismo externo, secuencias piroclásticas, colapso volcánico, unidades de flujo y zonas de depósito aluvial. A su vez, estas unidades se clasificaron por tipos de morfología/ litología, para tener una subclasificación más amplia y detallada (Figura 22). Estas unidades se obtuvieron de la interpretación de modelos morfométricos con una resolución de píxel de 15 m, tales como: inclinación de la pendiente, rugosidad, curvatura y amplitud del terreno, así como del análisis de ortofotos y consulta bibliográfica. A continuación, se describen:

Vulcanismo externo

Esta unidad se distingue por tener estructuras volcánicas diferentes en morfología a las del resto del complejo, ya que, aunque su forma no está bien conservada, no son similares. Dos polígonos de esta unidad se localizan al WSW y el tercero, al límite S del área de estudio. Juntos conforman el 1.8% de la superficie total. Morfométricamente, los rangos de amplitud van de los 41 a >100 m/ 0.5 km², con dos clasificaciones: lomeríos y montañas (Figura 12).

Secuencias piroclásticas

Esta unidad contempla a los depósitos de flujos piroclásticos, y a los vulcano-lacustres, tanto norte como sur, conformando el 54.52% de la superficie total del CVLP.

Los depósitos de flujos piroclásticos (Toba Tala) están ubicados principalmente al W del complejo, aunque también en el sector sur. Su morfología es similar a la de un manto, se extiende de este a oeste con una longitud de 12.9 km, y de norte a sur con 19.8 km. Mantiene una superficie generalmente plana con pendientes de 0 a 10°; los rangos de amplitud se

ubican en las clasificaciones de planicies onduladas a acolinadas (2.6-40 m/ 0.5 km²). Es la unidad más extensa del complejo, conforma el 38.93% de la superficie total. Como se muestra en el perfil B-B' (Figura 23, b) esta unidad guarda un desnivel de al menos 200 m respecto a las planicies circundantes al CVLP y una topografía medianamente disectada; su densidad de fracturas o lineamientos estructurales es alta.

Las secuencias o depósitos vulcano-lacustres muestran características morfológicas distintas al resto de las unidades, en parte por su origen (material), y en otra gran parte por su evolución geológica (eventos de formación y deformación). Como ya se mencionó anteriormente, estos depósitos sufrieron importantes transformaciones, desde sus inicios como lago somero, pasando por su división en dos secciones norte y sur, hasta su extinción debido al levantamiento topográfico. Morfológicamente, tanto la unidad norte como sur tienen características distintas.

La unidad norte, mantiene pendientes poco inclinadas (0-10°) en la mayoría de su superficie, y una amplitud topográfica con valores de 16-100 m /0.5 km² que la clasifica como planicies acolinadas a lomeríos. Como se puede observar en el perfil A-A' (Figura 23 a) mantiene una topografía con pendientes suaves y la cantidad de arroyos o drenajes es baja, así como también la densidad de fracturas o lineamientos estructurales; esta unidad representa el 4.84% de la superficie total.

La unidad sur representa el 10.75% de la superficie total y muestra una mayor variación en los rangos de pendiente, desde los 0 hasta los 45° (estos últimos menos constantes). La amplitud topográfica también es mayor, clasificando zonas de lomeríos hasta montañas (41-100 m/ 0.5 km²). La densidad en drenajes y fracturas es evidentemente mayor, por lo que la

topografía es más agreste y disectada (Figura 23 a) conformada por barrancos profundos (Figura 20).



Figura 20. Vista panorámica desde la cima del domo Cerro Alto donde se aprecian las barrancas que caracterizan a la unidad sur. Tomada en abril de 2018.

Unidades de flujo

Esta unidad se compone por tres morfologías diferentes: domos, coladas y mantos de lava. El origen volcánico extrusivo se ha conjuntado en esta categoría y cubren un 37.92% de la superficie del CVLP. Las mayores elevaciones del complejo se encuentran en esta unidad y corresponden a los domos San Miguel y Planillas (P y Q) con 2190 y 2272 msnm, respectivamente.

La subcategoría de domos corresponde al 13.1% del área total y la conforman 17 unidades (A-N, Q, S y T en la Figura 22). La principal característica de estas unidades es que se conforman de un solo cuerpo, aunque las morfologías son variadas, los hay con geometría

típica: un crecimiento homogéneo en todas sus direcciones y un perfil con forma cóncava (ej. D y L), con bordes y formas irregulares (ej. A, B, C, E G, H, I, Q y S), un poco alargados (ej. F, K y T), y con grosores irregulares (ej. M, N y J). Los valores de amplitud los catalogan como lomeríos y montañas ($41 \rightarrow 100$ m/ 0.5 km²), y los rangos de pendientes son heterogéneos, la gran mayoría tiene superficies cumbrales amplias con rangos de 0 a 10° y laderas o bordes cortos y empinados que van de los 20 hasta $>45^\circ$ de inclinación. En la mayoría de estas estructuras se aprecia claramente la afectación topográfica por fallas y fracturas, generando “pequeños” grabens, desplazamientos, saltos y discontinuidades. Cabe destacar el efecto del control estructural en la ubicación de estos domos (anillo de fallas de la caldera principalmente).

En cuanto a las coladas y los mantos de lava, juntas conforman el 24.82% de la superficie total del complejo. Son geometrías resultantes de los flujos de lava, que dependen de la fluidez de ésta, mientras las coladas de lava tienen un eje de longitud mayor que su ancho, los mantos de lava tienen un ancho mayor que su longitud. Sus rangos de disección vertical les otorgan categorías de lomeríos y montañas ($41 \rightarrow 100$ m/ 0.5 km²). Las pendientes son generalmente del orden de los 0 a los 20° en sus superficies, y de 30 a $>45^\circ$ en los bordes (con unas pocas excepciones). Así como en los domos, el control estructural en forma de fallas y fracturas se aprecia en estas unidades, pero no es tan marcado.

Cabe mencionar que algunos de los domos ubicados en la Figura 22 (marcados con letras mayúsculas), no se delimitaron como un solo polígono por la razón que están contruidos por dos claras morfologías (coladas y mantos de lava) (Figura 21).

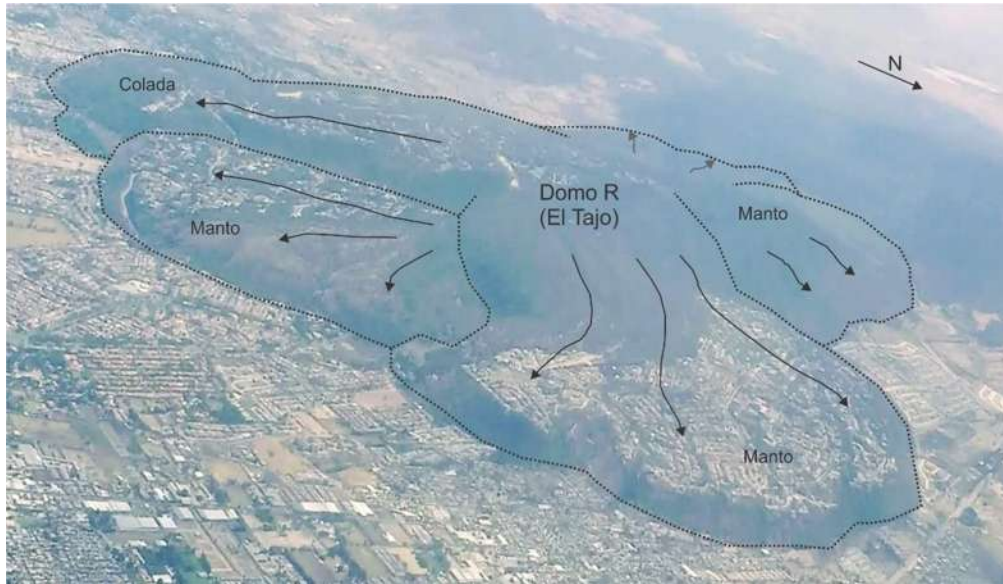


Figura 21. Fotografía aérea del domo El Tajo, donde se resaltan los flujos de lava que lo conforman. Tomada en mayo de 2019 por el Dr. Arturo Muñiz.

Colapsos volcánicos

Cubriendo un 4.72% de la superficie del CVLP, esta unidad presenta uno de los rasgos típicos de los depósitos de avalancha volcánica: montículos o humocks de dimensiones variables. Por los valores de disección vertical (16-100 m/ 0.5 km²) se encuentra principalmente en las categorías de planicies acolinadas y lomeríos, con pendientes variables desde los 0 hasta los 45°. Este depósito se asocia al colapso parcial del sector sur del volcán Planillas (Q), donde se observa un borde de colapso en forma de herradura abierto en dirección del desplazamiento del depósito.

Zonas de depósito

Esta categoría se refiere a zonas con poca extensión en las que ocurre el depósito de sedimentos aluviales y fluviales. Dentro del complejo ocupan el 1.03% de la superficie. Su morfología corresponde a pendientes <10° y valores de rugosidad también bajos, del orden de 0.01 a 0.40 (Figura 10 y Figura 13).

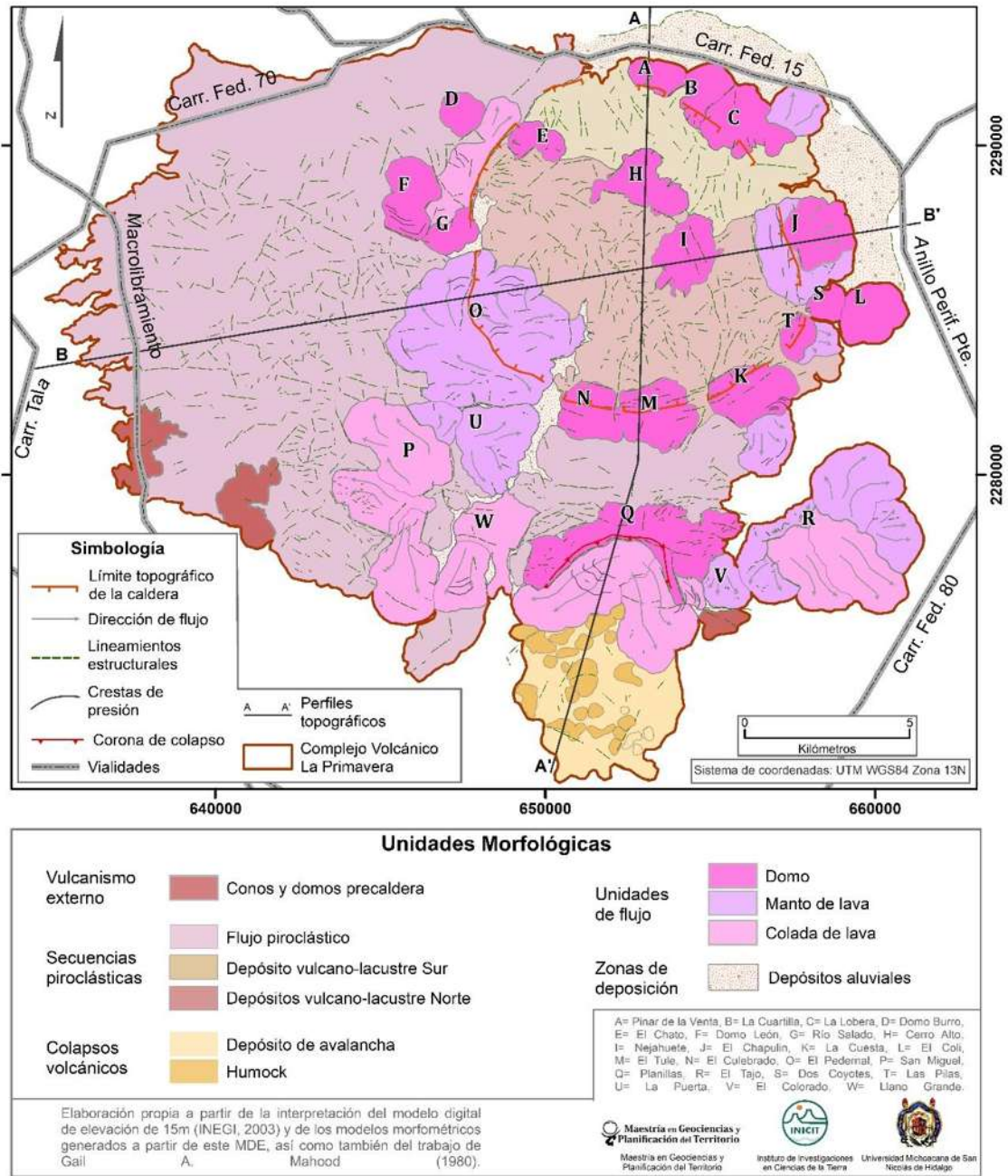


Figura 22. Mapa geomorfológico general del CVLP. Este mapa es parte del análisis hecho en este trabajo, que si bien toma como base lo propuesto por Mahood (1980), pero se da un enfoque geomorfológico a las unidades y a la leyenda.

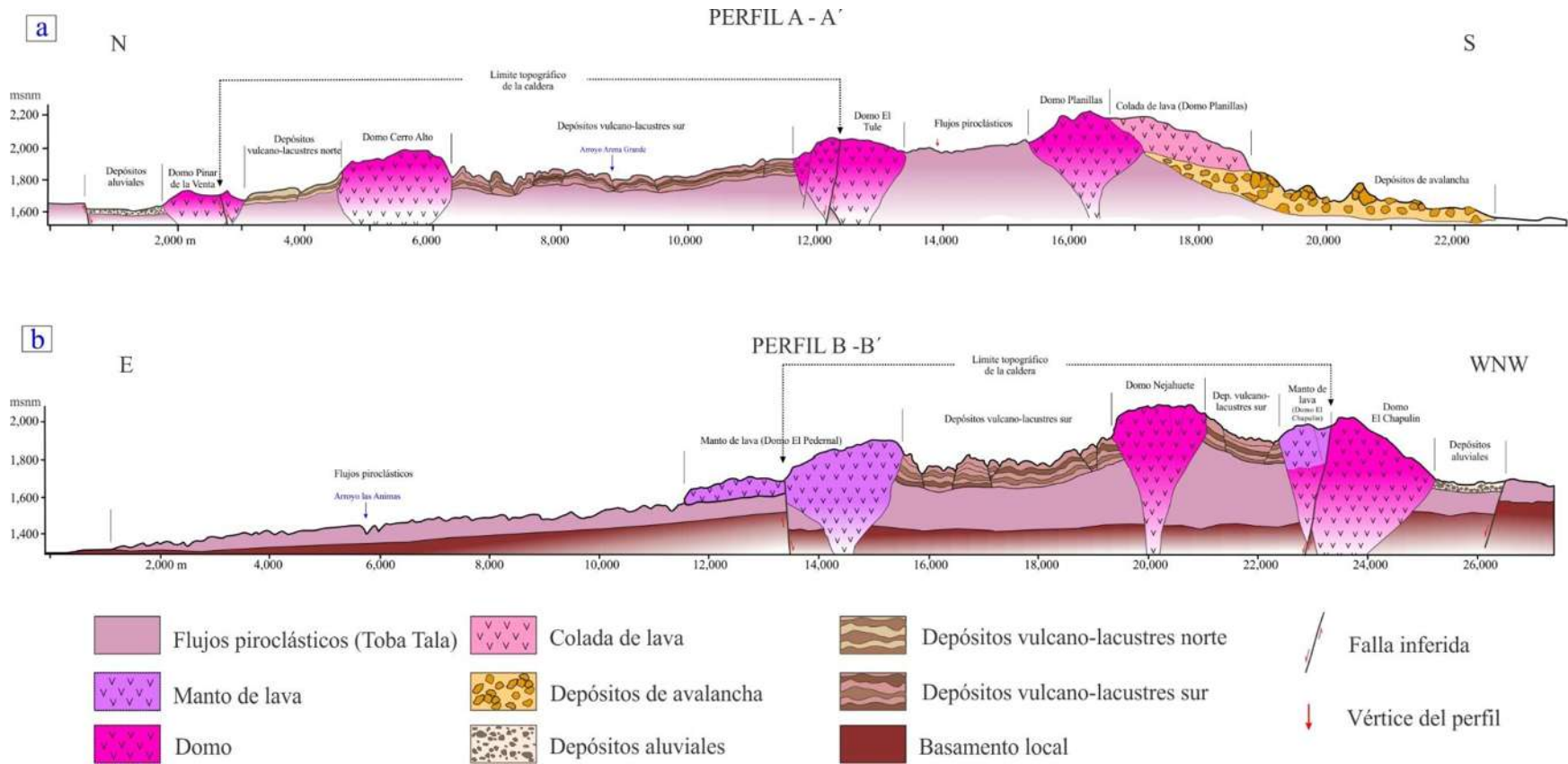


Figura 23. Perfiles topográficos del Complejo Volcánico La Primavera. Los perfiles muestran la topografía de cada una de las unidades morfológicas mencionadas en el texto anterior, no buscan esclarecer la sección geológica del complejo, por lo tanto, sus espesores, su morfología interna, así como los ángulos y profundidades de las fallas son esquemáticas.

3.4 Metodología

3.4.1 Análisis morfodinámico

Con el objetivo de identificar las principales morfologías de origen exógeno presentes en el área de estudio, se elaboró el mapa de geomorfología dinámica del CVLP, cuya elaboración consistió en seis etapas que se describen a continuación:

1. Recopilación de insumos

Búsqueda y recopilación de archivos digitales vectoriales y raster, y fotografías aéreas principalmente en formato digital (Tabla 2).

Estos insumos fueron la base del análisis y creación del mapa geomorfológico (Figura 22), que posteriormente fue la base del análisis y mapa morfodinámico, así como del análisis de la erosión por unidades volcánicas.

Tabla 2. *Insumos cartográficos durante el análisis geomorfológico.*

Insumo	Descripción	Tipo	Fuente
Fotografía área	33 fotografías escala 1: 40 000, año 2008 a color	Archivos digitales	INEGI (2008) (solicitadas vía email).
MDE	5 m, 15 m y 30 m de resolución por pixel.	Archivo raster	INEGI (2018), 5m; INEGI (2003), 15 y 30m.
Mapa hipsométrico	Creado a partir del MDE de 5 m	Archivo raster	Hecho en ArcMap 10.5
Mapa de morfologías endógenas	Polígonos de las unidades volcánicas.	Archivo vectorial	Elaboración propia
ArcMap® 10.5	Software para el trabajo de SIG		ArcGIS®
Estereoscopio de espejos			
Photoshop®	Software para la edición de imágenes y fotografías		Adobe Systems Incorporated®

2. Fotointerpretación y digitalización

Se realizó un análisis visual de las fotografías aéreas impresas con el estereoscopio de espejos para la identificación de los rasgos del relieve morfodinámico (barrancas erosivas o cárcavas, procesos de remoción en masa, red hidrográfica, caminos, zonas urbanas, etc.). Posteriormente los trazos fotointerpretados sobre acetatos se digitalizaron en formato vector.

3. Interpretación y análisis de mapas morfométricos

Se generó un modelo hipsométrico con el MDE de 5 m con un rango de valores extenso con una escala de colores amplia, que permitió resaltar morfologías de interés (surcos y barrancas) e interpretar algunos rasgos no visibles en las fotografías aéreas.

Además, se utilizaron los mapas de inclinación de la pendiente, rugosidad, curvatura, y sombras como herramientas de apoyo para detallar la cartografía de las unidades volcánicas y lineamientos estructurales.

4. Categorización de polígonos y creación de leyenda

Primero se identificaron las unidades que corresponderían a las unidades funcionales de una cuenca, resaltando 1) procesos de erosión hídrica, las cuales fueron: zonas con erosión difusa y concentrada, 2) zonas de erosión fluvial (patrones de drenaje o barrancas), y 3) zonas de deposición de sedimentos fluviales, aluviales y coluviales, y se complementó con otros procesos morfodinámicos como procesos de remoción en masa y cualquier proceso exógeno que fuera identificable en la escala de trabajo. Además, se incluyeron las morfologías de origen volcánico, los rasgos de alteración hidrotermal y

algunos rasgos de origen antrópico como las plataformas de pozos geotérmicos, bancos de material y vialidades principales.

La creación de la leyenda se basó en el siguiente orden jerárquico:

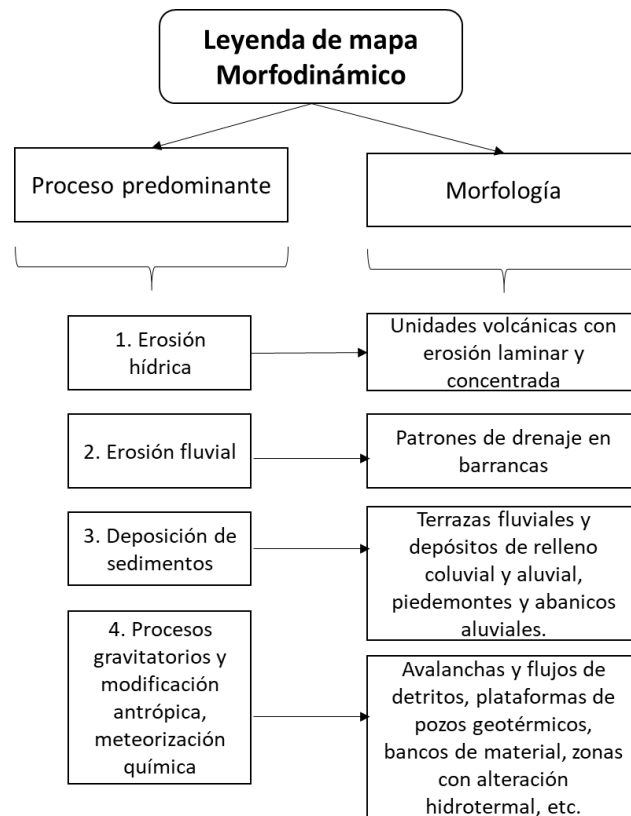


Figura 24. Jerarquización de la leyenda del mapa morfodinámico. Los pilares de la leyenda son los procesos exógenos predominantes y las morfologías resultantes o afectadas por estos procesos.

5. Edición final del mapa

3.4.2 Erosión hídrica: Factores de la ecuación RUSLE

Factor R, erosividad de la lluvia

Se recopilaron datos y registros de precipitación de la única estación meteorológica dentro del área de estudio, y de 23 estaciones meteorológicas ubicadas en un radio de 4 km (Tabla 3). Las estaciones contaban con datos entre 10 y 30 años y un valor Z (altitud) por encima de la mínima correspondiente a la zona de estudio (1340 msnm). A partir de estos datos se obtuvieron los promedios de precipitación media anual.

El mapa de regiones de erosividad de la lluvia en México (Cortés, 1991) fue utilizado para ubicar al CVLP dentro de una de las 14 regiones.

Tabla 3. *Instrumentos y material utilizado para el cálculo del factor R.*

Insumo	Fuente
Base de datos de estaciones meteorológicas	CONAGUA (2016)
Datos de registros meteorológicos	INIFAP
Dato de la estación La Primavera	CONANP
Software Google Earth®	Versión escritorio 2019
Mapa de regiones de erosividad de la lluvia.	Cortés (1991)

Se usó la ecuación de la región 7 del mapa de regiones de erosividad propuesto por Cortés (1991) que da como resultado unidades en MJ (Mega-Joules) · mm/ha.

$R = -0.0334X + 0.006661X^2$, donde X es la precipitación promedio anual en mm.

Una vez obtenidos los valores de R por estación, se realizó una interpolación IDW mediante el software ArcMap®, con el fin de obtener una capa raster con los valores de R, con un tamaño de pixel de 30 m.

Para clasificar los rangos de R se utilizó la siguiente Tabla:

Tabla 4. *Clasificación de la erosividad de las lluvias según el valor de R (modificado de Mannaerts, 1999).*

Clase	Erosividad R (Mj.mm/ha)	Clasificación
1	< 500	Muy baja
2	500 – 1000	Baja
3	1000 – 3000	Mediana
4	3000 – 6000	Alta
5	> 6000	Muy alta

Factor K, erodabilidad del suelo

El proceso metodológico para la obtención del factor K consistió en cinco etapas:

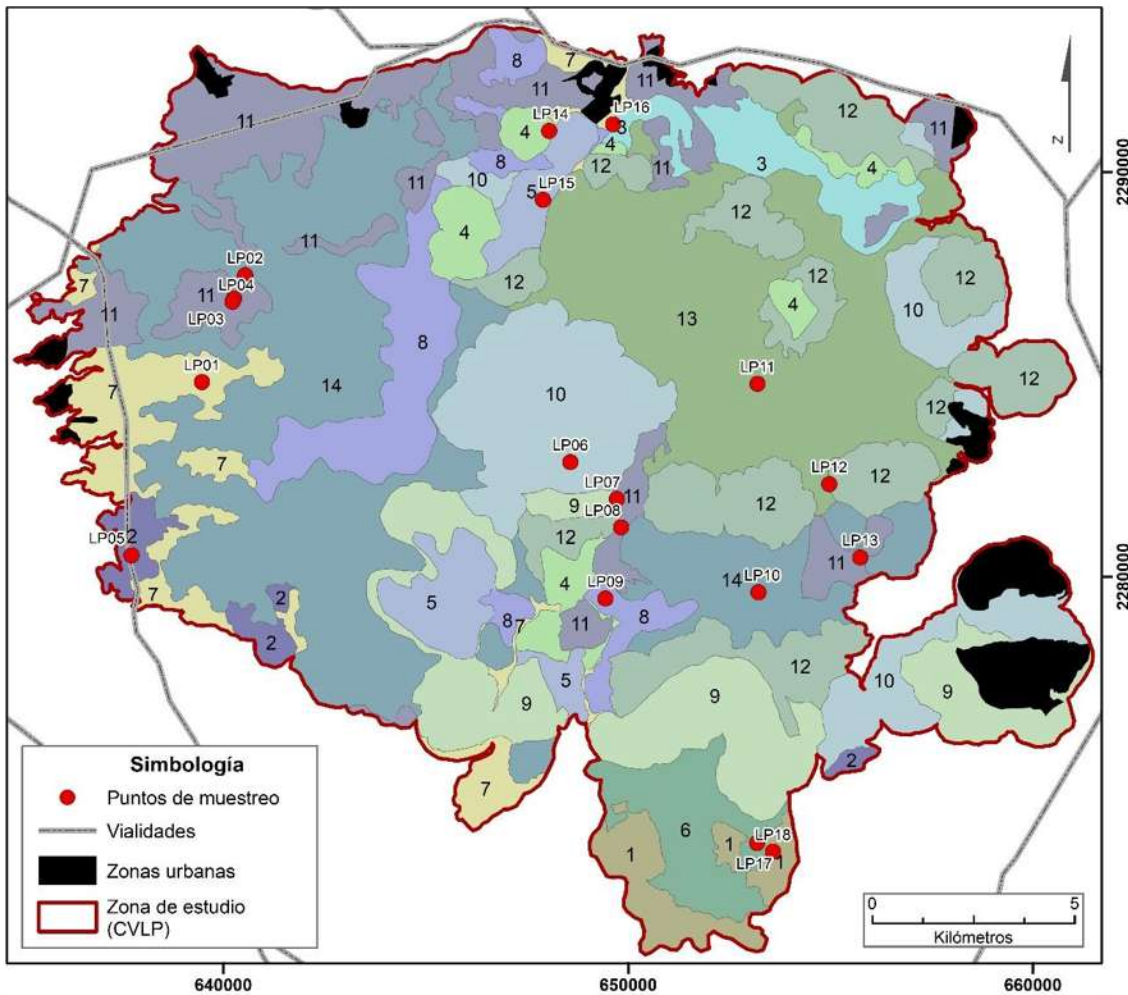
1. Recopilación de insumos cartográficos y elaboración de mapa de unidades geopedológicas

A partir de las capas de información recopiladas se delimitaron las unidades geopedológicas en función de la vegetación (tipo de cobertura), unidades morfológicas (relacionado al material parental, Figura 22), y precipitación media anual (pma) mediante ArcMap 10.5®. En el resultado se descartaron y/o agruparon los polígonos con áreas <1% debido a la escala de trabajo, obteniendo un total de 14 unidades (Tabla 5, Figura 25).

Tabla 5. *Unidades geopedológicas del CVLP.*

Unidad	PPA	Tipo de cobertura	Unidad Morfológica
1	800	Agrícola-Pecuaria-Forestal	Depósitos de colapso volcánico
2	1000	Vegetación inducida	Conos y domos precaldera
3	800	Bosque de coníferas	Flujos piroclásticos
4	800	Bosque de coníferas	Domo
5	1000	Bosque de coníferas	Colada de lava
6	1000	Bosque de encino	Depósitos de colapso volcánico
7	800	Vegetación inducida	Flujos piroclásticos
8	1000	Bosque de coníferas	Flujos piroclásticos
9	1000	Bosque de encino	Colada de lava
10	1000	Bosque de encino	Manto de lava
11	800	Agrícola-Pecuaria-Forestal	Flujos piroclásticos

12	1000	Bosque de encino	Domo
13	1000	Bosque de encino	Depósitos vulcano-lacustres
14	1000	Bosque de encino	Flujos piroclásticos



Legenda

Unidad	PPM	Tipo de cobertura	Unidad morfológica	Unidad	PPM	Tipo de cobertura	Unidad morfológica
1	800	A-P-F	DCV	8	1000	BC	FP
2	1000	VI	CDPC	9	1000	BE	CL
3	800	BC	FP	10	1000	BE	ML
4	800	BC	D	11	800	A-P-F	FP
5	1000	BC	CL	12	1000	BE	D
6	1000	BE	DCV	13	1000	BE	DVL
7	800	VI	FP	14	1000	BE	FP

Sistema de coordenadas: UTM WGS84 Zona 13N.

Figura 25. Mapa de unidades geopedológicas. En la leyenda, se muestran las características de clima (PPM, precipitación media anual), el tipo de cubierta (vegetal y uso de suelo), y topografía (unidad morfológica), de cada unidad geopedológica. También se muestran los sitios de muestreo y sus claves. Abreviaturas del tipo de cobertura: A-P-F= Agrícola-Pecuaria-Forestal, VI= Vegetación inducida, BC= Bosque de coníferas, BE= Bosque de encino. Abreviaturas de unidad morfológica: DCV= Depósitos de colapso volcánico, CDPC= Conos y domos precaldera, FP= Flujos piroclásticos, D= Domo, CL= Colada de lava, ML= Manto de lava, DVL= Depósitos vulcano-lacustres.

2. Selección de sitios de muestreo

Se muestreó 1 perfil de suelo por unidad, a excepción de la unidad 11 y 14 donde se realizaron 4 y 2 perfiles, respectivamente. En la Figura 25 se muestran la ubicación de los perfiles.

Las profundidades de los perfiles de suelo fueron de 30 cm (Figura 26), esto debido a que la erosión hídrica actúa solamente en los primeros 20 cm de suelo (Figuroa *et al.*, 1991).

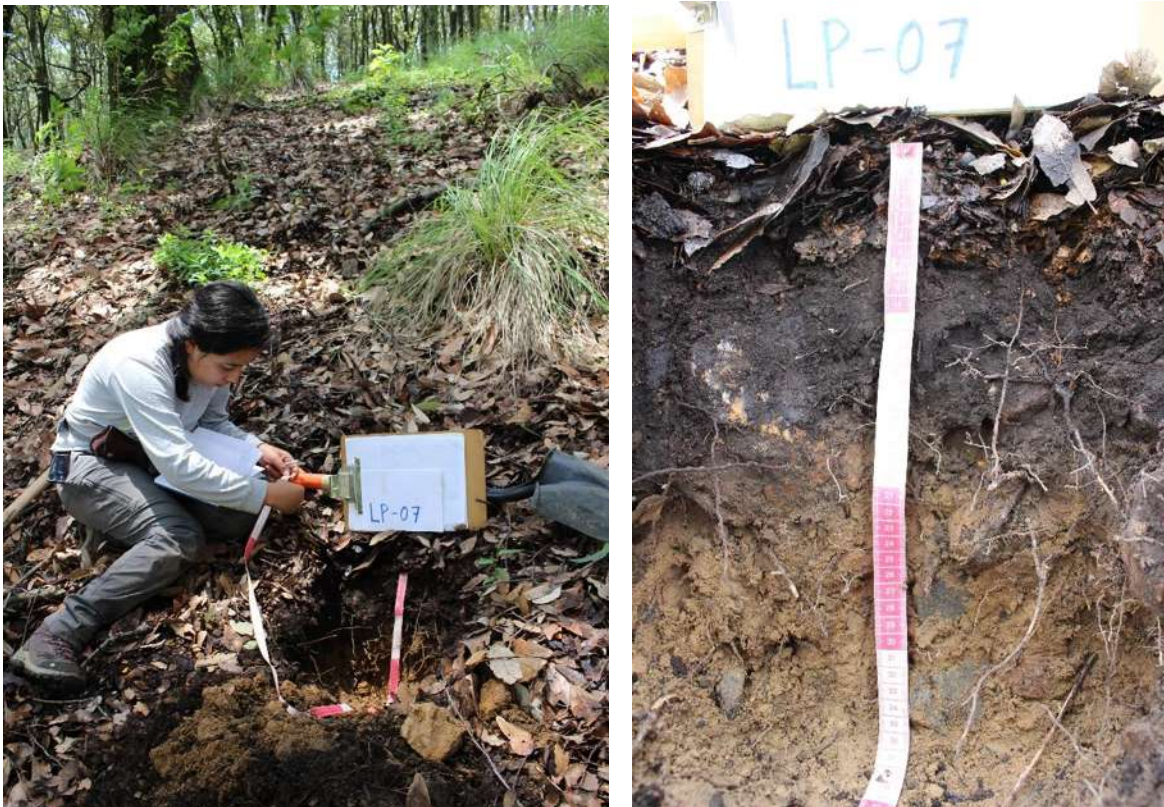


Figura 26. Imágenes de medición y obtención de muestras de suelo. Nótese la capa de casi 10 cm de hojarasca en este punto de muestreo.

La descripción y muestreo se realizó de acuerdo con el “Manual para la descripción de suelos en campo” (Siebe & Jahn, 1996).

3. Pruebas de laboratorio

Se realizaron los análisis de contenido de materia orgánica por el método de Walkley y Black de acuerdo con la norma AS07 (SEMARNAT, 2002) y el análisis textural por el método de Bouyoucos o del hidrómetro (Flores-Delgadillo & Alcalá-Martínez, 2010).

Contenido de materia orgánica

Para el cálculo de la materia orgánica a partir del carbono orgánico se utilizó el factor de Van Benmelen (SEMARNAT, 2002):

$$\% \text{ Materia orgánica} = \% \text{ C orgánico} * 1.724$$

Los valores obtenidos de materia orgánica se compararon con la siguiente tabla para su evaluación.

Tabla 6. *Clases por contenido de materia orgánica en suelos.*

Clase	Materia orgánica (%)	
	Suelos volcánicos	Suelos no volcánicos
Muy bajo	< 4.0	< 0.5
Bajo	4.1 – 6.0	0.6 – 1.5
Medio	6.1 – 10.9	1.6 – 3.5
Alto	11.0 – 16.0	3.6 – 6.0

Método de Bouyoucos o del hidrómetro

Se realizó un pretratamiento de eliminación de materia orgánica a las muestras (Figura 27) con el objetivo de que los resultados reflejen solo la fase mineral (Flores-Delgadillo & Alcalá-Martínez, 2010). También se realizó una prueba para saber si los suelos tenían

presencia de carbonatos utilizando una gota de HCl (ácido clorhídrico), con resultado negativo.



Figura 27. Procedimiento de eliminación de materia orgánica a muestras de suelo (fotos de izquierda a derecha): muestra seca tamizada a 2 mm; muestra tratada con peróxido de hidrógeno (H_2O_2); muestra limpia de materia orgánica.

Una vez obtenidos los registros con el hidrómetro se realizaron cálculos del tamaño de las partículas, y finalmente con ayuda del triángulo de texturas (USDA) se obtuvo la clasificación textural de los suelos.

4. Permeabilidad

El valor de la permeabilidad del suelo se obtuvo utilizando la tabla de “códigos y permeabilidad” para su uso en el nomograma de Wischmeier & Smith (1978) y usando la clasificación textural como dato base:

Tabla 7. Códigos de permeabilidad.

Textura	Código	Clasificación	Conductividad hidráulica (mm/hr)
Arenosa	1	Rápida a muy rápida	>60
Franco arenosa	2	Moderadamente rápida	20-60

Areno francosa			
Franco, franco limoso	3	Moderada	5-20
Franco arcillo arenosa	4	Moderadamente lenta	2-5
Franco arcillosa			
Franco limo arcillosa	5	Lenta	1-2
Arcillo arenosa			
Arcillo limosa, arcillosa	6	Muy lenta	<1

Fuente: Wischmeier & Smith. (1978) en Figueroa *et al.* (1991). La clase textural permite valorar de manera práctica la permeabilidad del suelo, y se otorga un código para poder ser usado en el nomograma de Wischmeier y obtener el valor de K.

5. Nomograma factor K

Una vez obtenidos los valores de materia orgánica, la clase textural, estructura del suelo (en campo), y la permeabilidad del suelo, se graficaron en el nomograma del factor K (Wischmeier *et al.*, 1971) para evaluar la erodabilidad de los suelos (Figura 28).

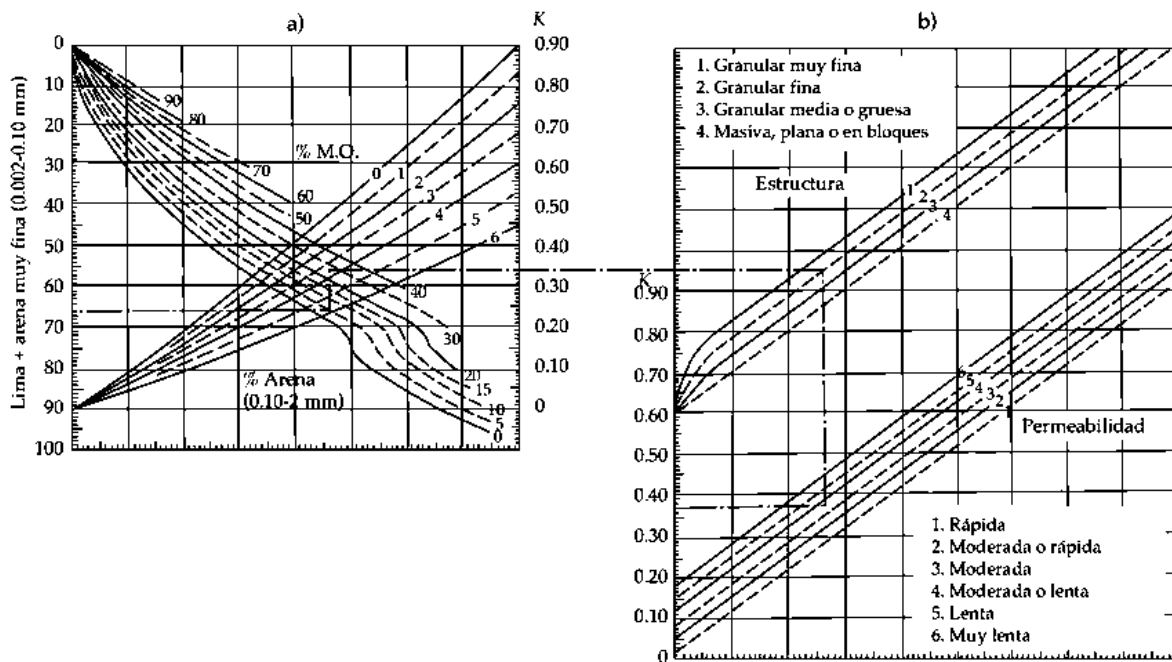


Figura 28. Nomograma del factor K en unidades del SI (Wischmeier *et al.*, 1971).

Con los valores de K obtenidos se elaboró un mapa, primero en formato vectorial y posteriormente fue rasterizado con un tamaño de pixel de 30 m.

Factor LS (efecto de la topografía)

Se usó un MDE de 30 m (INEGI, 2001) y los cálculos de las ecuaciones se realizaron mediante la herramienta Map Algebra del software ArcMap 10.3 (Figura 29).

Después de una revisión extensa de metodologías para el cálculo de este factor, se eligió comenzar basado en la expresión (4) propuesta por McCool *et al.* (1989):

$$LS = L \cdot S$$

Para calcular L, se eligió la ecuación (3) propuesta por Desmet & Govers (1996), ya que permite trabajar con sistemas pixelados directamente en la ecuación. Para esto, primero fue necesario calcular los factores (1) F y (2) m, por lo que se recurrió a utilizar las ecuaciones propuestas por McCool *et al.* (1989) y Foster *et al.* (1977), respectivamente, las cuales son las más utilizadas de acuerdo con la revisión bibliográfica y porque no se encontró alguna modificación de las mismas que mejorara su estimación.

Para el cálculo de S, se eligió la expresión (5) propuesta por McCool *et al.* (1989), donde toma en consideración longitudes de pendientes mayores a 4.5 m, así como inclinación de pendientes menores, iguales o arriba del 9%; características más acercadas a la realidad de nuestra zona de estudio.

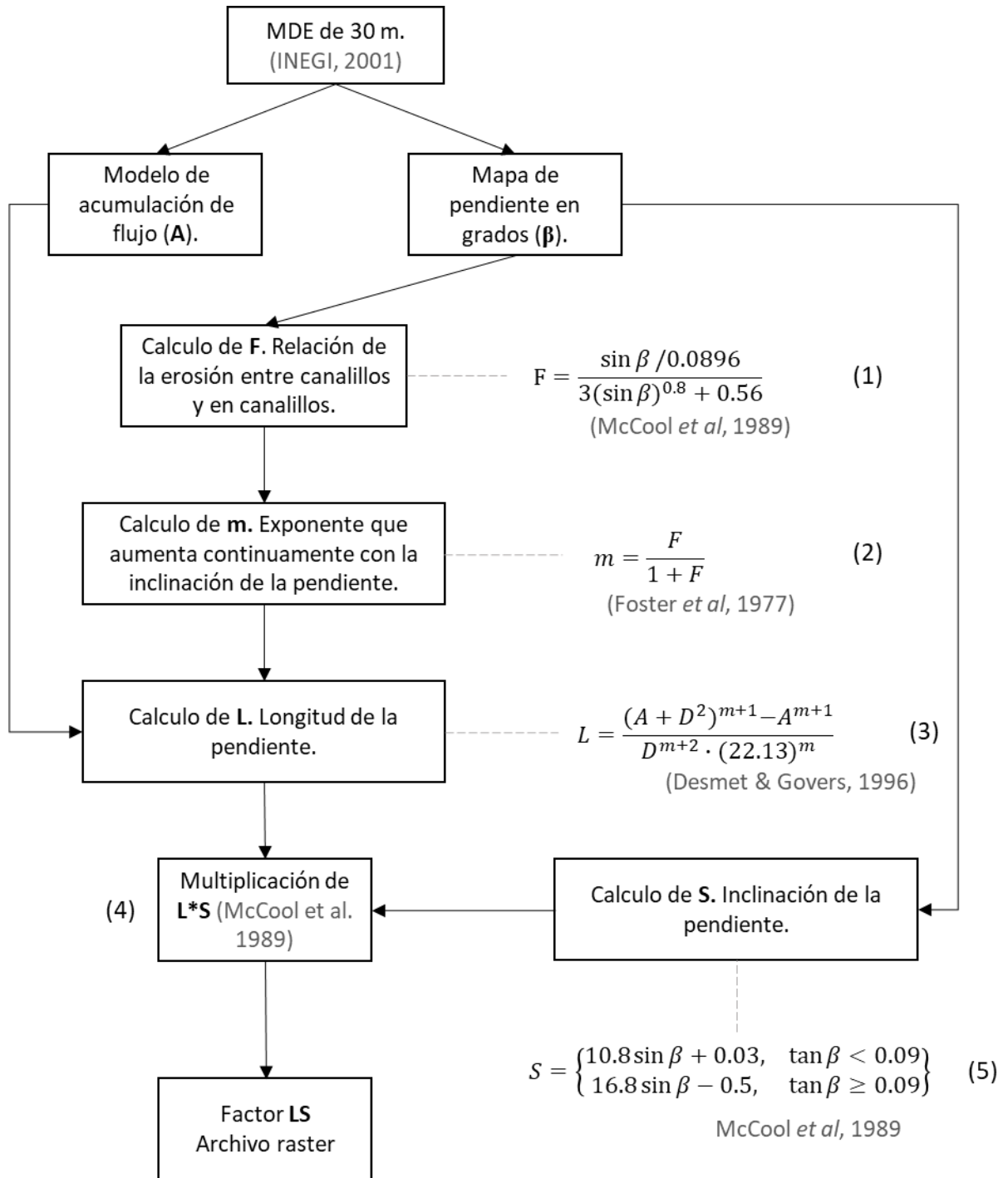


Figura 29. Diagrama de flujo para la elaboración del modelo de los factores L y S.

Factor C (cobertura vegetal)

Se modificó el conjunto de datos vectoriales de la carta de uso de suelo y vegetación (INEGI, 2013) actualizando los polígonos mediante imágenes satelitales recientes (Google Earth, 2019), y de acuerdo con la bibliografía revisada (Wischmeier & Smith, 1978, citado en Figueroa *et al.*, 1991; Dumas-Salazar, 2012) se le asignó un valor de C a cada uso de suelo (Tabla 8).

Tabla 8. Valores de C para las diferentes coberturas.

Tipo de cobertura	Valor de C	Descripción	Autor
Agrícola-Pecuario- Forestal	0.435	Cultivos anuales asociados con cultivos permanentes.	¹
Veg. 0.09	0.09	50% de cobertura por árboles sin arbustos, y 50% de cobertura por pastizal.	²
Veg. 0.042	0.042	20% de cobertura por arbustos, y 80% de cobertura por maleza.	²
Veg. 0.041	0.041	30% de cobertura por árboles sin arbustos, y 70% de cobertura por pastizal.	²
Forestal 2	0.004	70-45% de cobertura por follaje de árboles y arbustos, y 85-75% de cobertura de mantillo de más de 5 cm de espesor	²
Forestal	0.001	100-90% de cobertura por follaje de árboles y arbustos, y 100-90% de cobertura de mantillo de más de 5 cm de espesor	²
Zona urbana	0		

¹ = Dumas Salazar (2012); ² = Wischmeier & Smith (1978) en Figueroa *et al.* (1991). Veg. = Vegetación.

Factor P (prácticas de conservación del suelo)

No se observaron prácticas de conservación en los suelos del CVLP, por lo que este factor no se tuvo en cuenta.

3.4.3 Estimación de las tasas de pérdida de suelo (real y potencial)

Para la obtención de la estimación de la pérdida de suelo real se multiplicaron todos los factores R, K, LS, C y P. Para obtener la estimación de la pérdida de suelo potencial, se multiplicaron los factores K, R, y LS, ya que este valor escenifica susceptibilidad a la erosión para un suelo desnudo, por lo que no se emplearon los factores relacionados a la cobertura, usos de suelo y vegetación, y prácticas de conservación. Una vez obtenidos los mapas resultantes, se clasificaron conforme a las categorías de riesgo anotadas en la Tabla 9 (FAO, 1980). Para el análisis de erosión real y potencial por unidad volcánica, se utilizaron las unidades volcánicas obtenidas en el análisis morfodinámico.

Tabla 9. *Categorías de riesgo* de erosión en cuanto a la pérdida del suelo anual (FAO, 1980).*

Grado	Pérdida de suelo t/ha/año	Riesgo* de erosión
1	<0.5	Normal
2	0.5-5	Ligera
3	5-15	Moderada
4	15-50	Severa
5	50-200	Muy severa
6	>200	Catastrófica

* El concepto de riesgo actualmente se utilizaría como susceptibilidad.

4. Resultados

4.1 Análisis morfodinámico

Para conformar la leyenda del mapa morfodinámico se tomaron en cuenta las principales morfologías resultado de procesos exógenos y dinámicos presentes en el CVLP, así como las unidades resultado de su evolución volcánica, dando como resultado las unidades morfológicas que a continuación se exponen (Figura 30), mismas que son descritas a detalle en el subcapítulo siguiente.

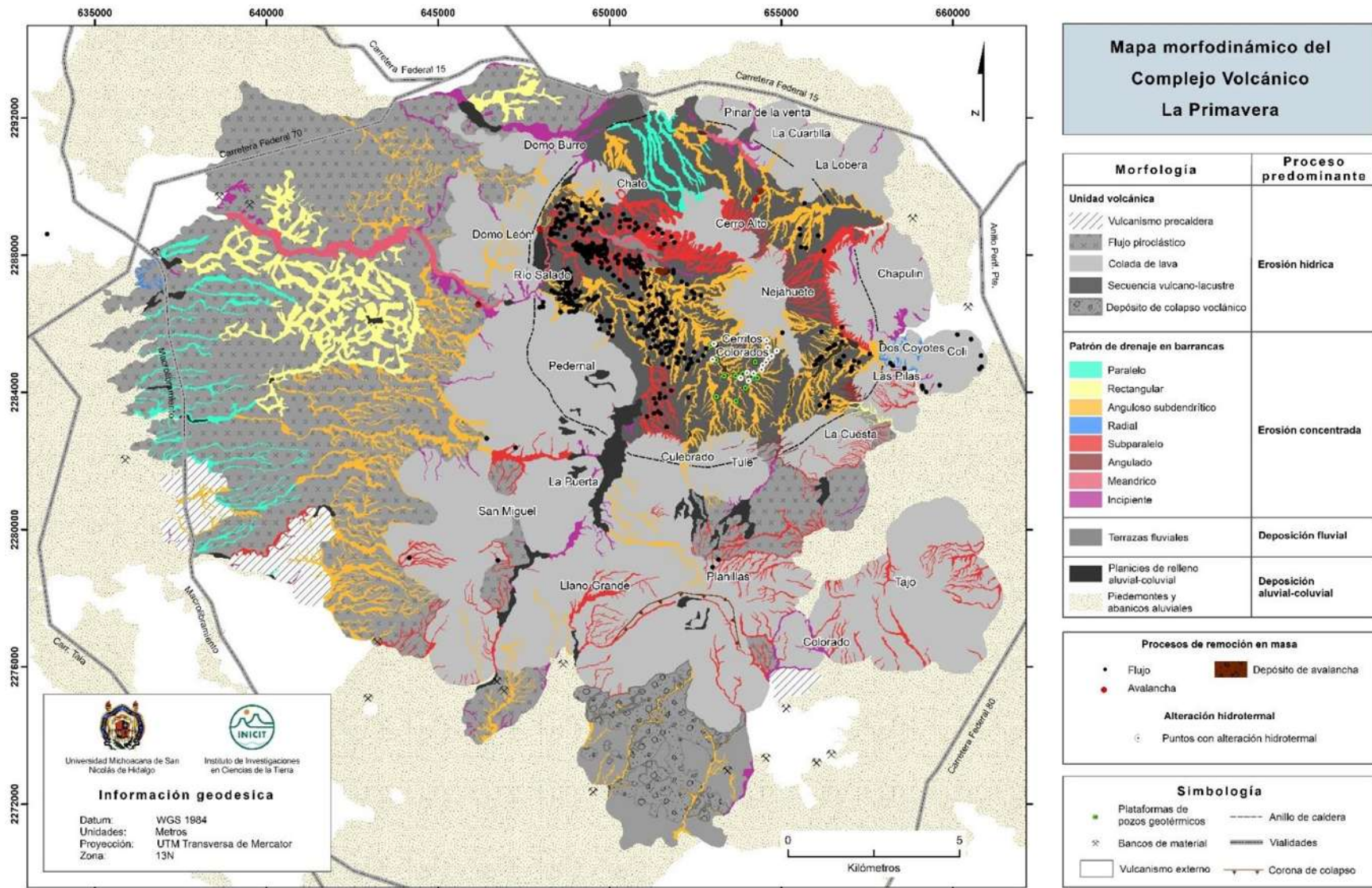


Figura 30. Mapa morfodinámico del Complejo Volcánico La Primavera. Se muestran los procesos exógenos naturales relacionados a la denudación y modificación de las geofomas , así como algunos rasgos antrópicos de impacto.

4.1.1 Morfologías

Unidades volcánicas

Esta categoría representa el relieve primario incluido durante las cuatro principales etapas geoevolutivas del CVLP (referente al Subcapítulo 3.3.2, p. 35) y sobre el que los procesos exógenos hacen efecto, principalmente la erosión hídrica de tipo laminar. Estas unidades corresponden a las unidades que fueron detalladas en el apartado “3.3.3 Geomorfología” (consultar pág. 42), pero debido a los objetivos del mapa se generalizaron como: Vulcanismo externo= Vulcanismo precaldera, Secuencias piroclásticas= Flujos piroclásticos y Secuencia vulcano-lacustre, Unidades de flujo= Coladas de lava, y Colapsos volcánicos= Depósitos de colapso volcánico. El porcentaje en superficie se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10. *Porcentaje del área ocupada por cada unidad volcánica en el CVLP.*

Unidad	Área (km²)	%
Flujos piroclásticos	147.7	39.4
Coladas de lava	143.8	38.0
Secuencia vulcano-lacustre	59.2	15.8
Depósitos de colapso volcánico	17.9	4.8
Vulcanismo precaldera	6.8	1.9
Total	375.4	100

Nota: No se incluyen las zonas de terrazas fluviales ni barrancas.

Morfología de barrancas (Patrón de drenaje)

Las barrancas o cárcavas reflejan el relieve denudativo principal en el CVLP, son producto de la erosión concentrada y el transporte de sedimentos y adquieren una morfología o patrón

particular dependiendo de varios factores como el material sobre el que se formen, el control estructural y el ambiente fluvial. A continuación, se describen los ocho tipos de patrón identificados en el área de estudio de acuerdo con Howard (1967) y Rackham (1973), pueden verse en el mapa de la Figura 30.

Barrancas con patrón de drenaje paralelo. En color verde, este patrón está desarrollado en la parte W del complejo sobre la unidad de flujos piroclásticos, y en un pequeño sector al N de la secuencia vulcano-lacustre. Este tipo de drenaje se desarrolla en zonas de baja pendiente dentro del complejo.

Barrancas con patrón de drenaje rectangular. Este patrón refleja un importante control estructural con incluso ángulos rectos, que reflejan el efecto de la tectónica regional y local sobre unidades de flujos piroclásticos (principalmente). Se muestra en color amarillo claro.

Barrancas con patrón de drenaje anguloso subdendrítico. Uno de los patrones más abundantes, se desarrolla en gran parte sobre la unidad de flujos piroclásticos y la secuencia vulcano-lacustre, también se encuentra sobre algunas coladas de lava y en la unidad de depósito de colapso volcánico. Es uno de los que se muestran más complejos y su desarrollo es libre, aunque con cierto control estructural, en algunas zonas delimita unidades de origen volcánico.

Barrancas con patrón de drenaje radial. Tiene poca influencia en el complejo, solamente dos áreas lo presentan: el domo Dos Coyotes y en el límite W de la unidad de flujos piroclásticos. Este patrón es normal en cuerpos volcánicos con una geometría regular.

Barrancas con patrón de drenaje subparalelo. Este es otro de los patrones con mayor representación en el complejo, mayormente desarrollado en los domos San Miguel, Planillas,

la Cuesta, el Tajo, y el Chapulín, y también en los bordes de los domos centrales (Cerro Alto y Nejahuete) sobre la unidad de depósitos vulcano-lacustres, la diferencia que se observa entre estas dos grandes zonas antes mencionadas es la anchura de las barrancas.

Barrancas con patrón de drenaje angulado. Se presenta en solo dos sectores al sur del anillo de la caldera: entre los domos el Tule y la Cuesta, y en el borde W del domo Las Pilas. Está directamente relacionado al control estructural del anillo de domos Sur, y al límite inferido de la caldera.

Barrancas con patrón de drenaje meándrico. Se localiza y da inicio sobre la unidad de depósitos vulcano-lacustres, en los cauces del Río Caliente y continua sobre el depósito de flujos piroclásticos dando lugar al Río Salado. Es propio de zonas bajas con poca pendiente, y donde el curso del río cambia constantemente y permite la deposición parcial de sedimentos.

Barrancas con patrón de drenaje incipiente. Es un patrón poco desarrollado, donde no se observa una geometría específica o clara. Hay muchos segmentos incipientes por todo el complejo, algunos podrán responder a un control estructural, sin embargo, la mayoría no son claros.

Relieve acumulativo

Estas morfologías se dan en ambientes de deposición de sedimentos, cuando la energía del agente transportador disminuye a tal punto que los sedimentos comienzan a acumularse, aunque ante un aumento del nivel del cauce estos sedimentos pueden ser movilizados nuevamente.

Terrazas fluviales. Localizadas únicamente en el cauce del arroyo Arena Grande, estas pequeñas zonas son parte de un proceso natural acumulativo de sedimentos a los costados del cauce del arroyo.

Planicies de relleno aluvial-coluval. Son pequeñas áreas aisladas o conectadas distribuidas en todo el complejo, se forman en las zonas más planas y áreas amplias de los arroyos principales del CVLP (Figura 31).



Figura 31. Planicie de depósitos fluviales con topografía prácticamente plana o de muy baja pendiente. Esta zona en particular es de las más extensas y es utilizada para cosecha de temporal. Tomada en agosto de 2018.

Piedemontes y abanicos aluviales. Corresponden a las áreas de baja pendiente (0 a 10°) o depresiones topográficas externas al complejo.

Procesos morfodinámicos predominantes

Erosión hídrica. Se refiere a la erosión hídrica de tipo laminar principalmente. Este proceso denudativo afecta prácticamente a todas las unidades volcánicas del CVLP con diferentes intensidades. Durante la etapa de campo, se observó en zonas de baja pendiente, caracterizada

por dejar acumulaciones de sedimentos y material orgánico perpendiculares a la pendiente, así como pequeñas rocas desnudas de suelo (Figura 32).



Figura 32. Suelo con rasgos de erosión hídrica laminar. Las flechas indican la dirección de la pendiente.

Erosión fluvial. Este proceso se presenta en las zonas de barrancas o cárcavas en forma de erosión hídrica concentrada. Afecta también a todas las unidades volcánicas, pero mayormente a los flujos piroclásticos y las secuencias vulcano-lacustres (Figura 30).

Deposición fluvial y aluvial-coluvial. Las deposiciones fluviales se presentan como acumulaciones de sedimento en los márgenes del cauce Arroyo Grande. La deposición aluvial-coluvial se manifiesta como acumulaciones de sedimentos en planicies de relleno distribuidas por todo el complejo, en los piedemontes de los domos y en las planicies externas al complejo formando abanicos aluviales.

Procesos de remoción en masa

Flujos. Dentro del CVLP se cartografiaron 480 procesos gravitatorios de tipo flujo. Mayormente se localizaron en las laderas de las barrancas de los depósitos vulcano-lacustres (Figura 33, a), aunque también se identificaron en los domos Chapulín, Colli, San Miguel, Pedernal y Planillas. Estos deslizamientos se han cartografiado sobre pendientes que van desde los 10° hasta más de 45°. Durante el proceso el material desprendido presenta un movimiento de flujo que viaja cuesta abajo sobre la ladera, dejando sin vegetación la superficie afectada (Figura 33, b)). Debido a la escala de trabajo, en el mapa se visualizan como puntos.



Figura 33. a) Imagen satelital donde se aprecia la densidad de flujos de suelo sobre la secuencia vulcano-lacustre (superficies claras). Imagen de Google Earth de 2005. b) Imagen satelital de la morfología de flujo, las flechas indican la dirección de la pendiente. Este flujo en particular se encuentra sobre la ladera Sur del domo Cerro Alto (captura tomada de Google Earth).

Avalanchas. En total se cartografiaron 6 procesos gravitatorios de tipo avalancha dentro del CVLP. Son cuerpos de mayor espesor y volumen que los flujos, su morfología es irregular y presentan un escarpe de colapso notoriamente más grande, algunos se asemejan a deslizamientos traslacionales.

Alteración hidrotermal

Puntos con alteración hidrotermal. En el CVLP este proceso se presenta de manera puntual como alteración hidrotermal en la unidad de depósitos vulcano-lacustres principalmente, donde existen manifestaciones de tipo fumarolas en las que se llegan a observar precipitaciones de azufre.

Relieve antropogénico

Plataformas de pozos geotérmicos. Se trata de plataformas artificiales construidas para soportar la infraestructura de los pozos geotérmicos, en las que la topografía ha sido aplanada y han utilizado sacos de arena para construir muros falsos que soporten los bordes de las plataformas. Éstas se encuentran en el sector Sur de la secuencia vulcano-lacustre. En la base de estos muros se observó erosión remontante (Figura 34).



Figura 34. Borde de una de las plataformas de pozos geotérmicos donde se puede apreciar erosión de tipo remontante en la base del muro falso.

Bancos de material. Estos rasgos extractivos se observan dentro y fuera del CVLP y se han cartografiado al menos 17 de ellos. Suelen generar cortes verticales en la superficie y modificar drásticamente la topografía en poco tiempo, además de eliminar la cubierta vegetal y extraer suelo y material subsuperficial (Figura 35).



Figura 35. Banco de material donde se extrae material ignimbrítico (Toba Tala). Tomada en agosto 2018.

4.2 Ecuación RUSLE

4.2.1 Factor R (erosividad de la lluvia)

Los valores resultantes para el CVLP del factor R fueron del rango de 4,984 hasta 8,099 MJ mm/ha hr (Figura 36). Los valores más altos se ubican en la parte NNE del CVLP, mientras que los más bajos predominan hacia la parte SSE y SE. Según la clasificación de rangos típicos de R anual (Tabla 4) los valores obtenidos para el periodo húmedo tienen un rango de erosividad de alto a muy alto.

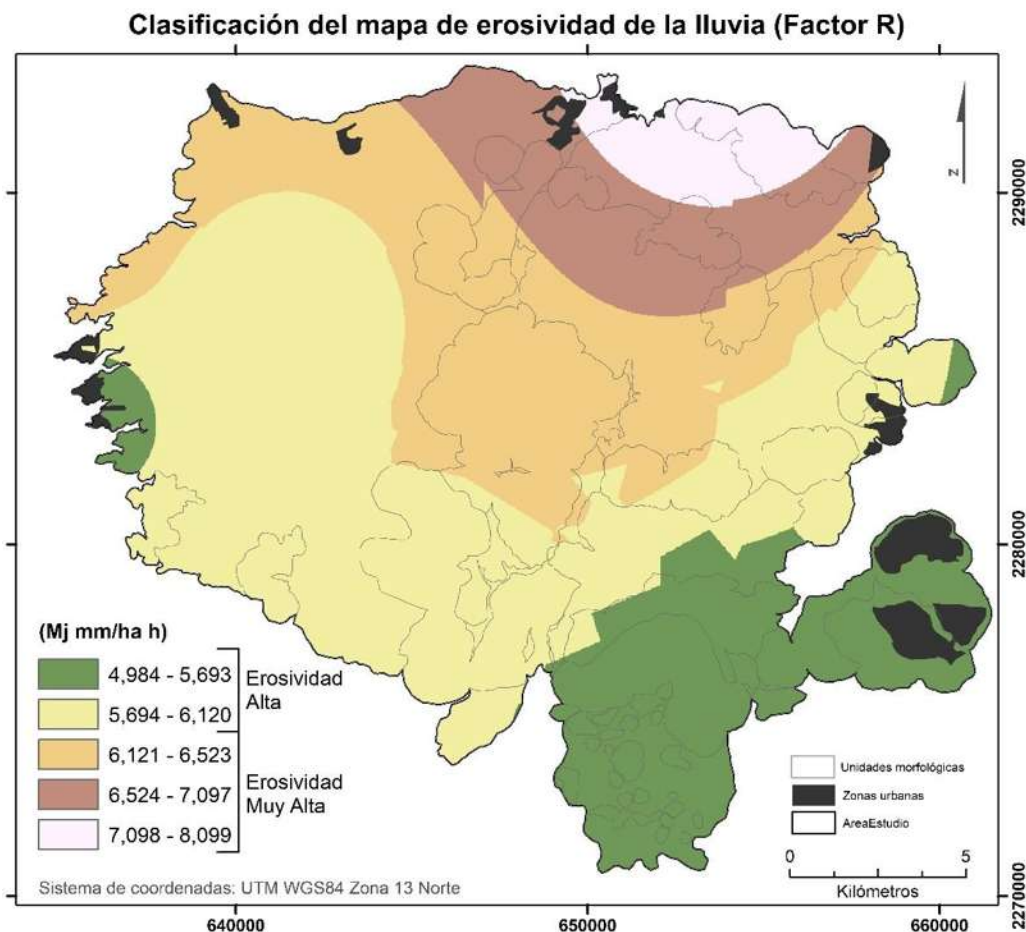


Figura 36. Mapa de erosividad de la lluvia del CVLP, en el cual se superpusieron los polígonos de las unidades morfológicas para ubicar mejor las zonas de mayor erosividad. La clasificación de los valores corresponde a los propuesto por Mannaerts (1999).

4.2.2 Factor K (erodabilidad del suelo)

Los valores en el mapa de erodabilidad del CVLP (Figura 37) se encuentran en la categoría de muy poco erodable según la clasificación de los grados de erodabilidad (USDA 1962, en Amezcuita & Silva, 1990).

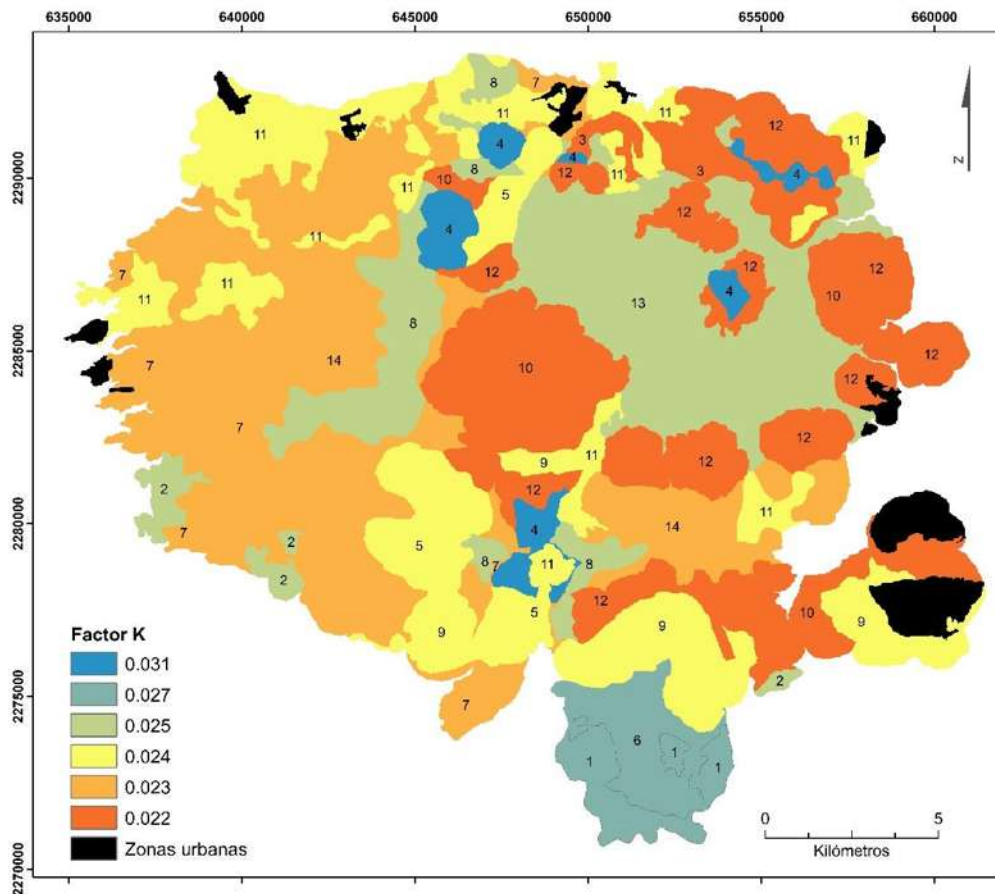


Figura 37. Factor K en el CVLP. La numeración del 1 al 14 corresponden a las unidades pedogenéticas muestreadas en campo. Sistemas de coordenadas: UTM WGS84 Zona 13N.

La clasificación de partículas de los perfiles de suelo muestra que el perfil LP03 es el que presenta el mayor porcentaje de limos+arenas finas (32.6%), mientras que el perfil LP08 presenta el menor porcentaje (20.3%). El perfil LP05 tiene el porcentaje de arcillas más alto (32.4%), mientras el perfil LP08 tiene el valor más bajo (3.2%) (Figura 38).

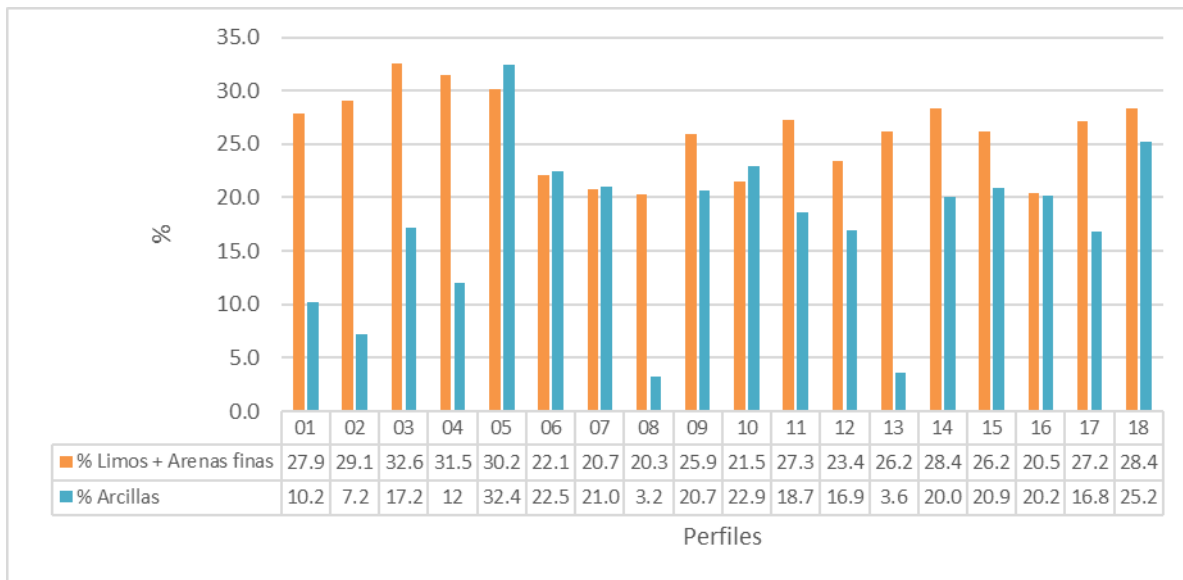


Figura 38. Porcentajes de limos + arenas finas y de arcillas para los horizontes superiores de cada perfil de suelo.

4.2.3 Factor LS (topografía)

En el CVLP los valores de inclinación y longitud de la pendiente varían entre 0.03 a 168.25 (Figura 39). Los valores más bajos se reflejan en la parte oeste y norte del mapa, y en menor proporción, pero de manera homogénea, sobre la cima de cada una de las estructuras volcánicas y en el sector centro sur del complejo. Los valores más altos se ven reflejados en los bordes de las estructuras volcánicas, aunque también se observan en los valles de los arroyos más grandes al oeste del mapa y la zona centro, asociados a sistemas de barrancas.

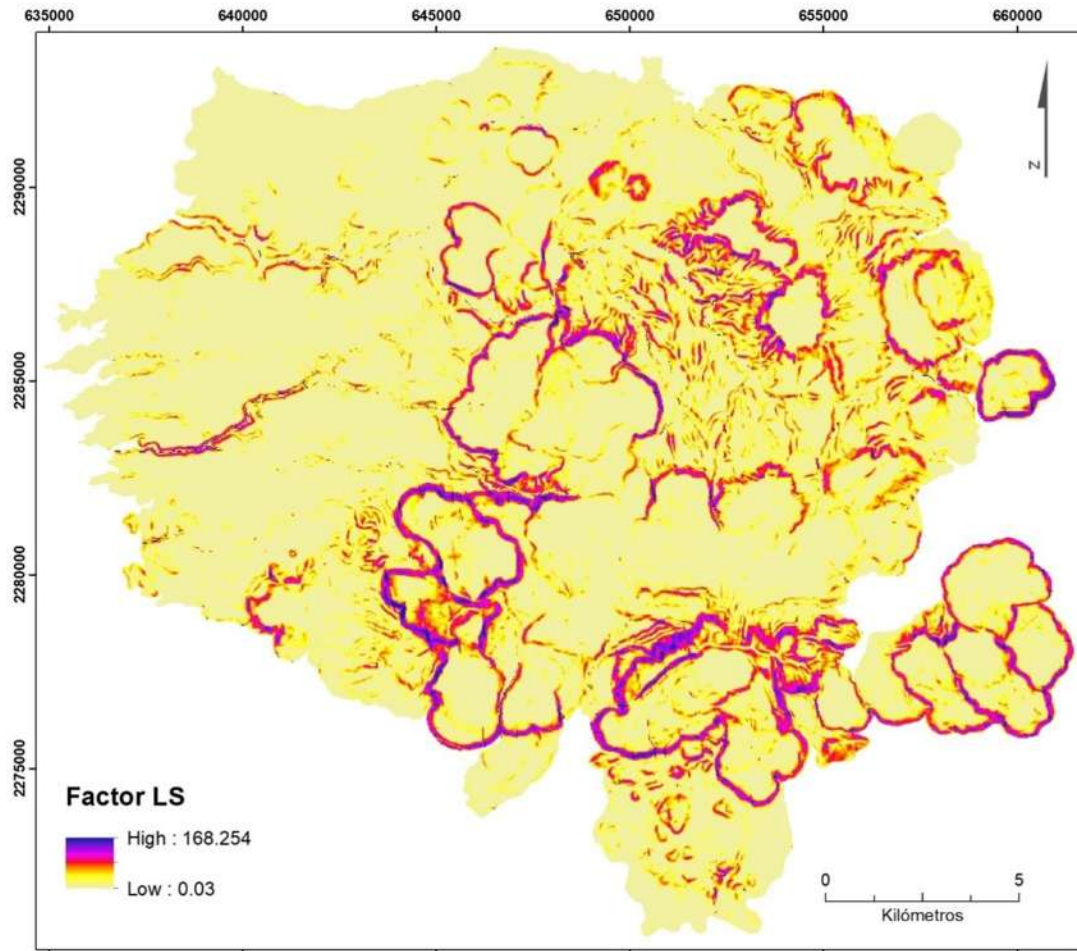


Figura 39. Mapa del factor LS del CVLP. Sistemas de coordenadas: UTM WGS84 Zona 13N.

4.2.4 Factor C (cobertura vegetal)

Se obtuvieron 6 valores para el factor C (Figura 40, Tabla 11). El uso de suelo agrícola presenta el valor más alto (0.435) y ocupa el 17.1% de la superficie del CVLP. El valor más bajo de C (0.001) estuvo en vegetación predominante de bosque, ya fuese de pino y/o encino, esta clase ocupa un 54.7% de la superficie total, siendo el más predominante.

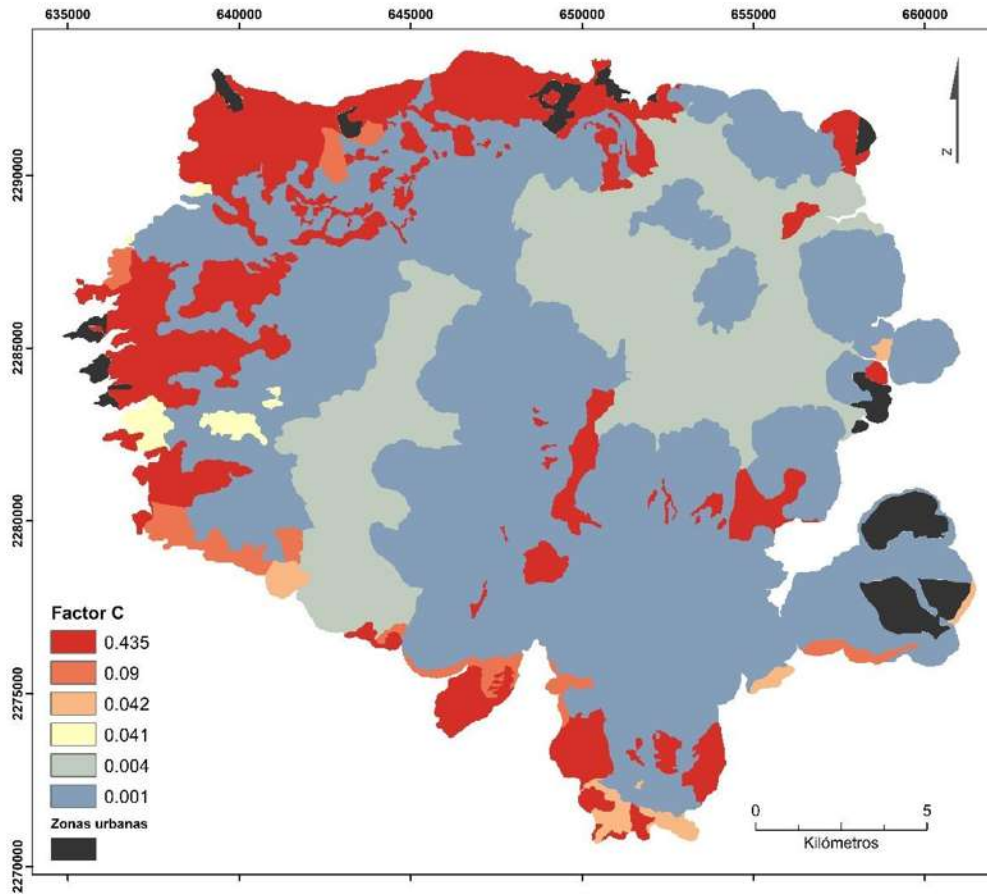


Figura 40. Mapa del factor C. Sistema de coordenadas: UTM WGS84 Zona 13N.

Tabla 11. Predominancia de los valores de C según porcentaje de cobertura.

Tipo de cobertura	Valor de C	Área (km ²)	%
Forestal 1	0.001	207	54.7
Forestal 2	0.004	80	21.2
Agrícola-Pecuario-Forestal	0.435	65	17.1
Zona urbana	0	11	2.9
Veg3.	0.09	9	2.4
Veg1.	0.042	4	1
Veg2.	0.041	3	0.7
Total, km²		379	100

Veg₁ = Arbustos numerosos 20% y maleza con un 80% de cobertura. Veg₂ = Árboles sin arbustos 30% y pastizal 70%. Veg₃ = Árboles sin arbustos 50% y pastizal 50%. Forestal 1= Árboles y arbustos 100-90% y 100-90% cobertura de mantillo de >5 cm de espesor. Forestal 2 = Árboles y arbustos 70-45% y 85-75% cobertura de mantillo de >5 cm de espesor. Veg. = Vegetación.

4.3 Erosión hídrica real

El mapa de erosión hídrica real (Figura 41) es el resultado de la interacción de: la erosividad de la lluvia (Factor R) con valores de 4984 a 8099 y clasificaciones de erosividad alta y muy alta; la erodabilidad del suelo (Factor K) con valores entre 0.022 y 0.031 clasificándolos como muy poco erodables; la longitud e inclinación de las pendientes (Factor LS) con prevalencia de valores bajos; el tipo de cobertura vegetal (y uso del suelo, Factor C) que va de 0.001 hasta 0.435; y las prácticas de manejo de los suelos (Factor P), que para nuestro caso de estudio es igual a 1. Los resultados arrojaron celdas con valores que van desde 0 hasta 7957.91 t/ha *año, sin embargo, de acuerdo con el histograma del modelo obtenido, la mayoría de las celdas se concentran en valores de 0 a ~250 t/ha *año, no siendo representativas las celdas con valores mayores. El modelo fue clasificado de acuerdo con las categorías de riesgo (susceptibilidad) de erosión en cuanto a la pérdida de suelo anual que propone FAO (1980), obteniendo los siguientes porcentajes de superficie:

Tabla 12. *Porcentajes de superficie ocupada por cada una de las categorías de susceptibilidad de erosión real en el CVLP. El área considerada para este cálculo incluye zonas de depósito aluvial-coluvial, terrazas fluviales y barrancas.*

Valores (t/ha * año)	Categoría	% de superficie en el CVLP
0-0.5	Normal	41.34
0.5-5	Ligera	37.47
5-15	Moderada	3.35
15-50	Severa	8.91
50-200	Muy severa	7.36
>200	Catastrófica	1.57

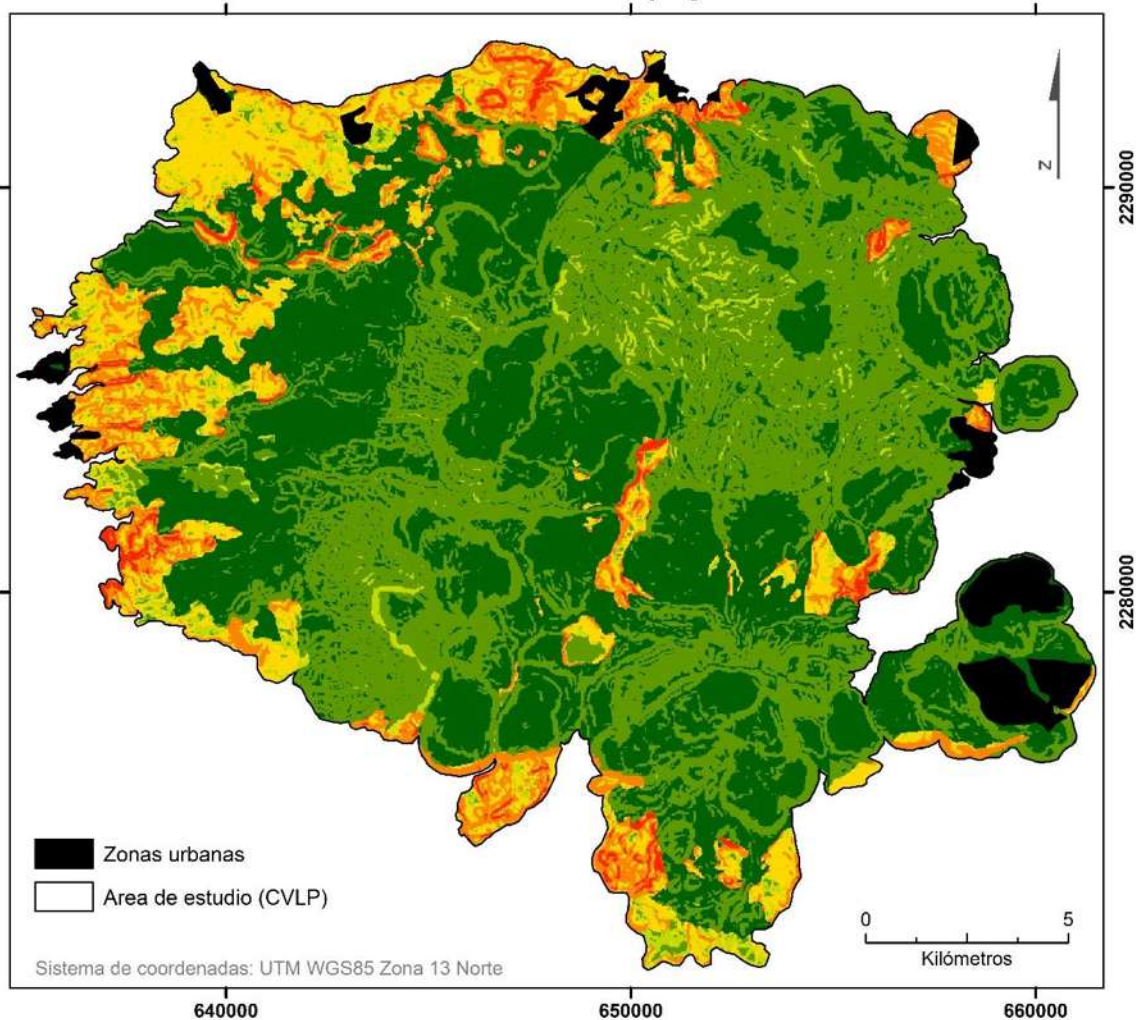


Figura 41. Modelo de erosión hídrica real del Complejo Volcánico La Primavera.

El modelo y los porcentajes en superficie de cada categoría muestran que los valores predominantes en todo el CVLP son los de 0-0.5 t/ha*año y 0.5-5 t/ha*año, que corresponden a un grado de susceptibilidad normal y ligera, respectivamente, las cuales tienen una presencia del 78.81% de la superficie total. Las categorías severa y muy severa (15-200 t/ha*año) también tienen una representación importante: 16.27% de la superficie total.

4.3.1 Erosión hídrica real anual por unidad volcánica

El análisis de la erosión hídrica real anual para cada unidad volcánica se hizo con base a los valores promedio de las tasas de erosión (t/ha), este índice es comparable entre las unidades debido a que sus áreas no interfieren en los resultados. Los valores oscilan entre 4.40 y 60.71 t/ha*año (Tabla 13), siendo la unidad de vulcanismo precaldera (5) la que presenta el valor máximo, seguido por el depósito de colapso volcánico (2) con una tasa promedio de 34.46 t/ha*año, después le sigue la unidad de flujos piroclásticos (3) con 23.38 t/ha, luego la unidad secuencia vulcano-lacustre con 12.92 t/ha, y finalmente la unidad de colada de lava (2) (Figura 42).

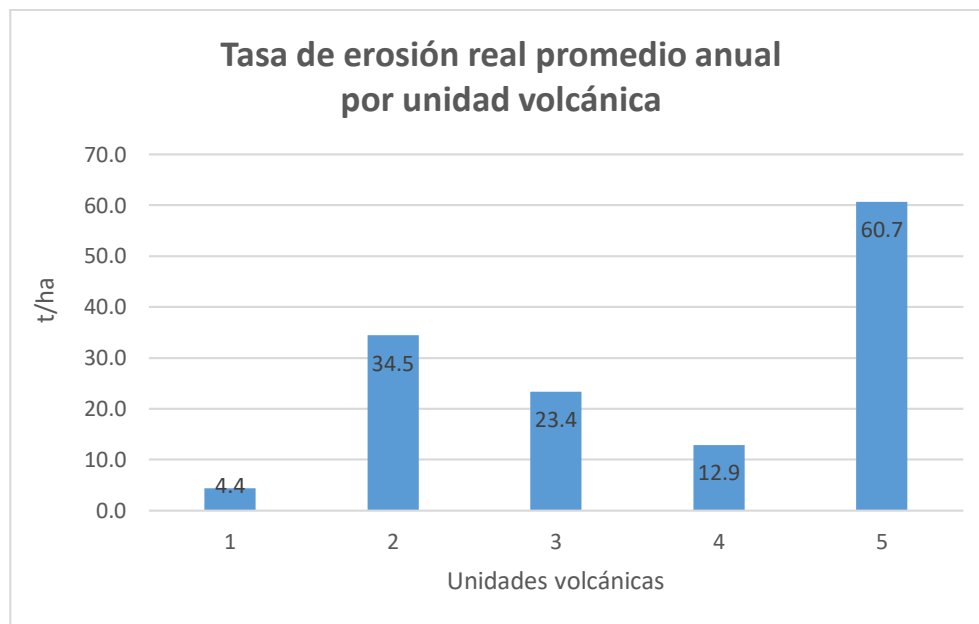


Figura 42. Gráfica de la tasa de erosión real promedio anual contra unidad volcánica.

Por otro lado, el área total de las unidades (ha) sí influye en los valores resultantes de los índices de suelo total erosionado (t), volumen de suelo erosionado (m^3) y profundidad erosionada (mm), pero no de manera decisiva, ya que si comparamos el área de la unidad colada de lava con la de flujos piroclásticos vemos una diferencia de 3840 ha, pero en relación

con los factores mencionados, los valores para la unidad de flujos piroclásticos reflejan mayor pérdida (Tabla 13).

Tabla 13. *Valores de erosión real anual por unidad volcánica.*

EROSIÓN HÍDRICA REAL ANUAL						
	Unidad volcánica	t/ha (prom)	Masa total de suelo erosionado (t)	Volumen total de suelo erosionado (m ³)	Profundidad erosionada (mm)	Área total de las unidades (ha)
Colada de lava	1	4.40	62,669	51,792	0.36	14226
Depósito de colapso volcánico	2	34.46	57,089	47,181	2.85	1657
Flujos piroclásticos	3	23.38	243,364	201,127	1.93	10386
Secuencia vulcano-lacustre	4	12.92	44,711	36,951	1.07	3463
Vulcanismo precaldera	5	60.71	46,474	38,408	5.02	765

Nota: Para el cálculo de profundidad erosionada se utilizó una densidad aparente de 1.1 g/cm³, estimada a partir de las características predominantes de los suelos.

En la siguiente figura (Figura 43) se muestra el porcentaje de superficie ocupado por grado de severidad de la erosión real sobre cada unidad volcánica. Los datos muestran que las clases normal y ligera tienen los mayores porcentajes de representación en superficie, corroborando lo mencionado en los resultados generales. Las unidades de vulcanismo precaldera y depósito de colapso volcánico son las que presentan mayor homogeneidad en sus porcentajes y donde predominan las clases severa, muy severa y catastrófica.

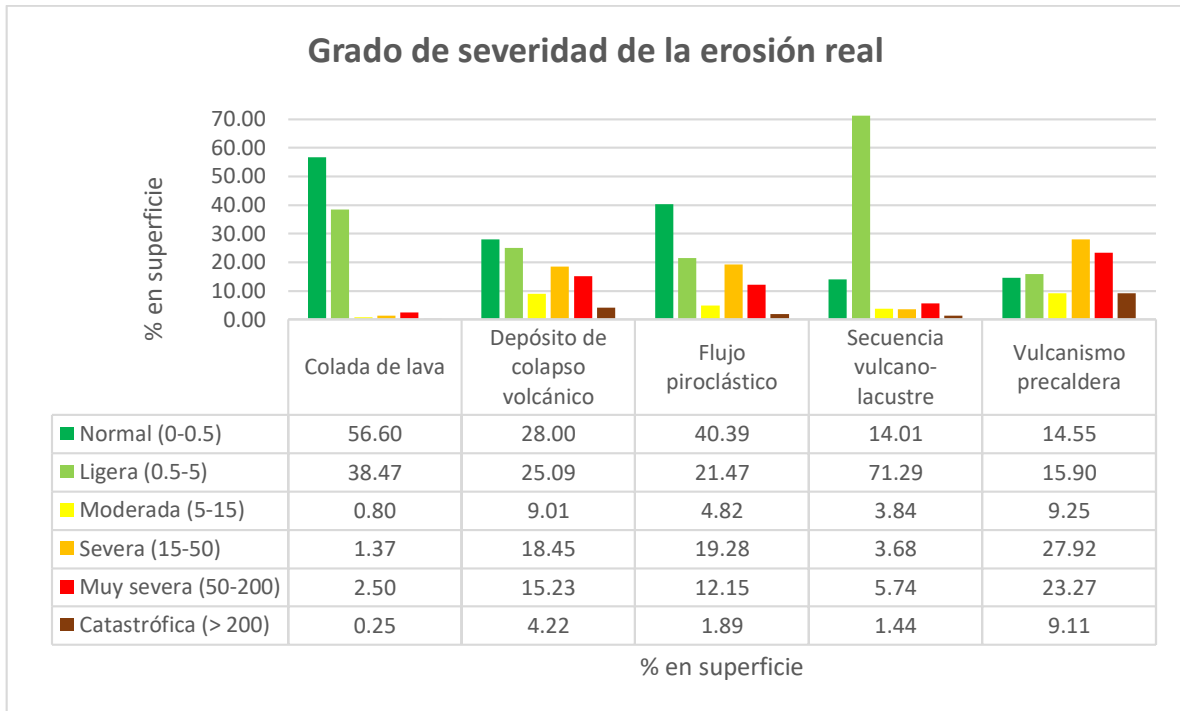


Figura 43. Gráfica del porcentaje de superficie ocupado por grado de severidad de la erosión real sobre cada unidad volcánica.

4.4 Erosión hídrica potencial

A comparación de la erosión real, el modelo de erosión potencial anual representa un escenario donde no se considera la cobertura vegetal, y donde los factores R, K y LS definen las probabilidades y tasas de erosión (Figura 44). Este modelo arroja valores desde 0 hasta 33230.31 t/ha*año, aunque en realidad la mayoría de celdas del modelo se concentran entre 0 y ~2100 t/ha*año según su histograma. Los porcentajes de superficie ocupada por cada una de las categorías de susceptibilidad de erosión potencial en el CVLP se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 14. Porcentajes de superficie ocupada por cada una de las categorías de susceptibilidad de erosión potencial en el CVLP. El área considerada para este cálculo incluye zonas de depósito aluvial-coluvial, terrazas fluviales y barrancas.

Valores (t/ha * año)	Categoría	% de superficie en el CVLP
0-0.5	Normal	3.11
0.5-5	Ligera	0.59
5-15	Moderada	0.42
15-50	Severa	5.34
50-200	Muy severa	31.83
>200	Catastrófica	58.71

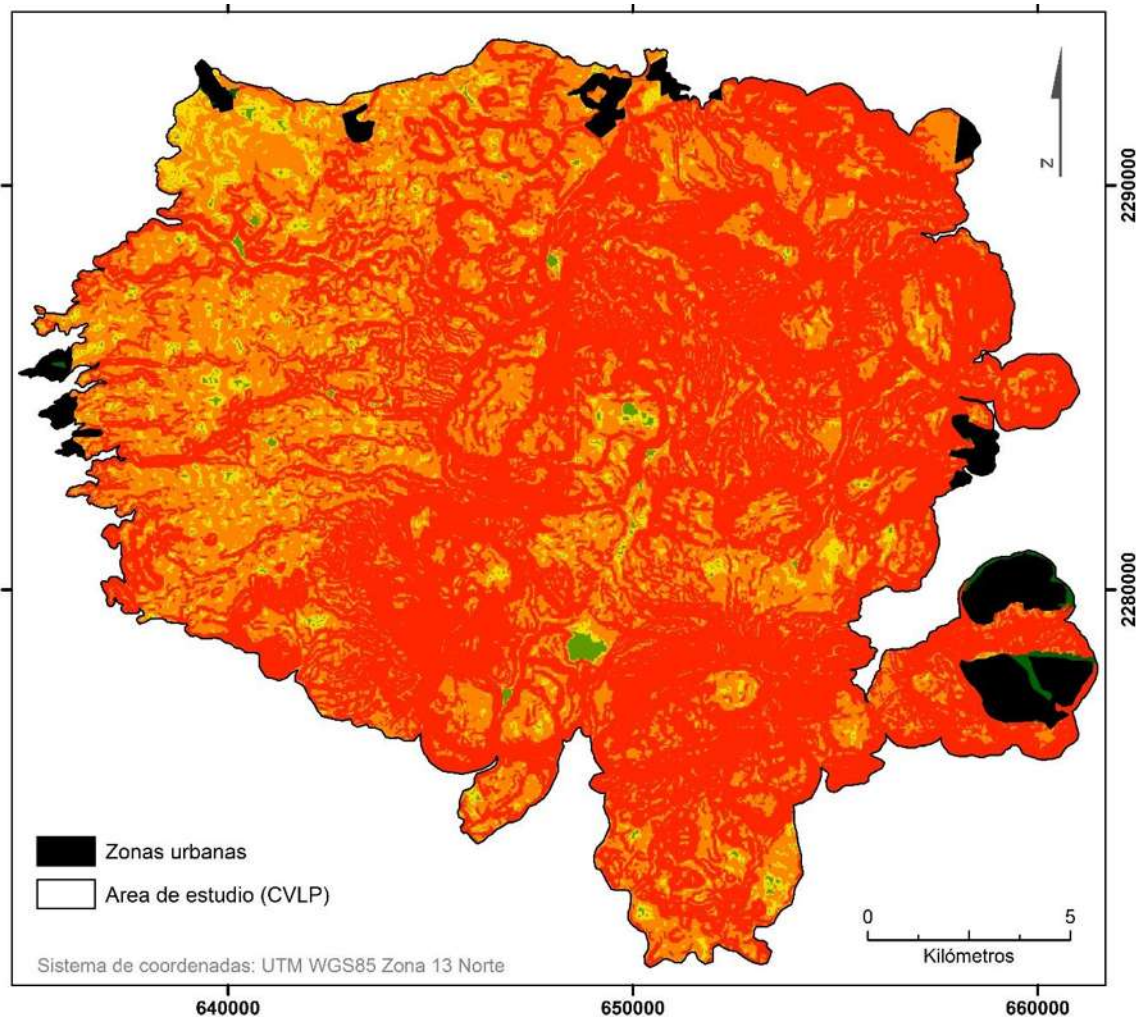


Figura 44. Modelo de erosión hídrica potencial del Complejo Volcánico La Primavera.

El modelo y los porcentajes en superficie de cada categoría muestran un escenario donde la susceptibilidad a la erosión de tipo catastrófica (58.71% de la superficie total) predomina en todo el complejo, seguida por la categoría de muy severa con 31.83%. El 9.46% restante de la superficie del CVLP presenta valores de 0 a 50 t/ha*año.

4.4.1 Erosión hídrica potencial anual por unidad volcánica

Se calcularon las tasas de erosión potencial promedio por unidad volcánica (Figura 45), así como también la masa total de suelo erosionado (t), el volumen total de suelo erosionado (m^3), y la profundidad erosionada (mm) (Tabla 15).

El promedio más alto de las tasas de erosión por unidad para este escenario es de 521.62 t/ha*año y corresponde a la unidad de vulcanismo precaldera, la unidad de colada de lava tiene el segundo promedio más alto con 507.8 t/ha*año, le sigue la secuencia vulcano-lacustre con 488.48 t/ha*año, después el depósito de colapso volcánico con 380.13 t/ha*año, y finalmente la unidad de flujos piroclásticos con el promedio más bajo, 228.35 t/ha*año (Figura 45).

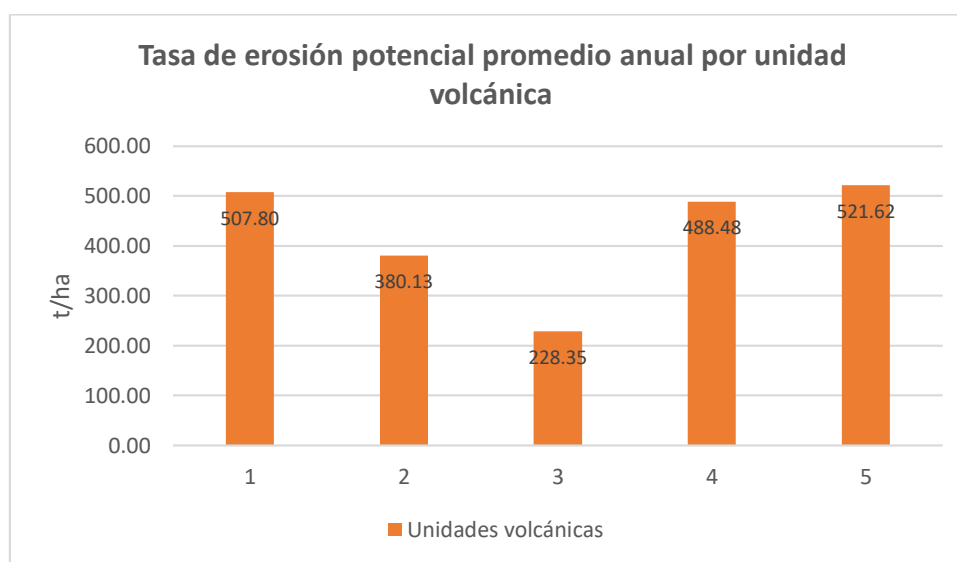


Figura 45. Gráfica de la tasa de erosión potencial promedio anual contra unidad volcánica.

El comportamiento de las unidades volcánicas respecto a los otros índices calculados para este escenario (Tabla 15), la unidad de colada de lava presenta los más altos valores en cuanto a masa y volumen total de suelo erosionado con valores de hasta 7,232,489 t, y 5,977,263 m³ respectivamente, mientras los valores más bajos para esos mismos índices se encuentran en la unidad de vulcanismo precaldera, con 399,275 t, y 329,979 m³, respectivamente. Por otro lado, se observa un comportamiento inverso en cuanto a la profundidad de suelo erosionado en milímetros, ya que la unidad de vulcanismo precaldera tiene el valor más alto (43.11 mm); en segundo lugar, la unidad de colada de lava con 41.97 mm, le sigue la secuencia vulcano-lacustre con 40.38 mm, después el depósito de colapso volcánico con 31.42 mm, y al final los flujos piroclásticos con 18.87 mm de suelo erosionado.

Tabla 15. *Valores de erosión potencial anual por unidad volcánica.*

EROSIÓN HÍDRICA POTENCIAL ANUAL						
	Unidad volcánica	t/ha (prom)	Masa total de suelo erosionado (t)	Volumen total de suelo erosionado (m ³)	Profundidad erosionada (mm)	Área total de las unidades (ha)
Colada de lava	1	507.80	7,232,489	5,977,263.29	41.97	14226
Depósito de colapso volcánico	2	380.13	629,730	520,438.26	31.42	1657
Flujos piroclásticos	3	228.35	2,377,382	1,964,778.67	18.87	10386
Secuencia vulcano-lacustre	4	488.48	1,691,085	1,397,590.82	40.37	3463
Vulcanismo precaldera	5	521.62	399,275	329,979.48	43.11	765

Nota: Para el cálculo de profundidad erosionada se utilizó una densidad aparente de 1.1 g/cm³, estimada a partir de las características predominantes de los suelos.

El porcentaje de superficie ocupado por grado de severidad de la erosión potencial sobre cada unidad volcánica (Figura 46), muestra una predominancia importante de los rangos de 50 a

>200 t/ha*año sobre la mayoría de las unidades volcánicas, con la excepción de la unidad de colada de lava que muestra un valor importante en la categoría de erosión normal (0-0.5 t/ha*año). En comparación con el escenario de erosión real vemos que la unidad de vulcanismo precaldera sigue siendo la que mayor porcentaje de superficie tiene con la categoría catastrófica, y que este mismo rango (>200 t/ha*año) se dispara en todas las unidades al no haber una cobertura vegetal sobre ellas.

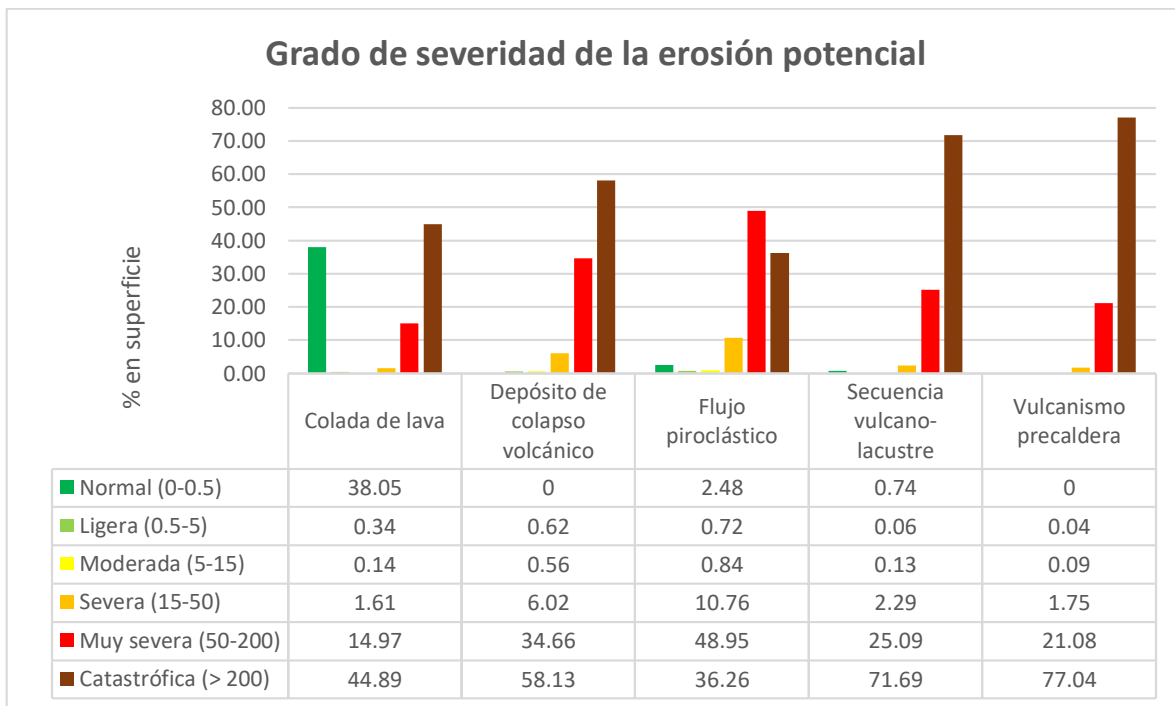


Figura 46. Gráfica del porcentaje de superficie ocupado por grado de severidad de la erosión potencial sobre cada unidad volcánica.

5. Discusión de los resultados

5.1 Morfología y morfodinámica del Complejo Volcánico La Primavera

Las unidades volcánicas propuestas en este estudio (Figura 30), vulcanismo precaldera, flujos piroclásticos, secuencia vulcano-lacustre, colada de lava, y depósitos de colapso volcánico, fueron basadas en la cartografía de trabajos previos (Mahood *et al.*, 1980; 1983), Maciel-Flores y Rosas-Elguera (1992), y Tinoco-Murillo (2017), sin embargo, a partir del análisis morfológico se discuten algunas discrepancias y concordancias.

El origen de la unidad de depósito de colapso volcánico se asocia a una etapa postcaldérica, derivada del colapso parcial del domo Planillas, evidencia de esto es la corona de colapso en forma de herradura y abierta hacia el sur. También lo es la dirección del depósito de avalancha y los hummocks asociados a ésta, el tamaño de estos montículos se ve disminuido conforme se alejan de la fuente de origen. Además, las dos coladas de lava que surgen desde el centro de la corona de colapso del domo se superponen a este depósito, lo que significa que fueron expulsadas posterior al episodio de colapso. Esto concuerda con lo descrito por Rivera-Olguín (2016), donde menciona que este depósito es producto de un evento tipo Bezymianny (Siebert *et al.*, 1987), que consiste en el colapso de un sector del edificio volcánico por la fuerza y presión de una intrusión magmática, lo que genera inestabilidad y colapso de la estructura. Este tipo de actividad volcánica concuerda con la evolución propuesta por este mismo autor, y con la morfología resultante que se observa actualmente del domo Planillas, donde las coladas de lava son producto de esa intrusión de magma.

El análisis morfológico de la secuencia vulcano lacustre realizado en este trabajo mostró diferencias entre los sectores norte y sur en cuanto a todos los parámetros morfométricos

(inclinación de la pendiente, disección vertical, rugosidad, etc.). En el análisis morfodinámico también se encontraron diferencias, por ejemplo, la densidad y diferencias entre los estilos de patrones de las cárcavas o barrancos, la densidad de procesos de remoción en masa de tipo flujo, los puntos de alteración y manifestación hidrotermales.

Estas diferencias son producto de la evolución geológica del lago y del complejo en general. Cuando se separó el lago los materiales de sedimentación fueron distintos (Dorantes-Zavaleta, 2018). El levantamiento topográfico causado por la realimentación de la cámara magmática o un cuerpo intrusivo (Almaguer *et al.*, 2019) no fue homogéneo, levantado más el sector sur del lago y provocándole mayor exposición a procesos exógenos (PRM y erosión hídrica). Ese mismo levantamiento provocó una mayor densidad de fracturas en la unidad sur (Almaguer *et al.*, 2019), facilitando así la existencia de manifestaciones hidrotermales (Bolós *et al.*, 2019) y el desarrollo de escurrimientos.

La mayoría de los procesos exógenos presentes en el CVLP han ocurrido durante miles de años desde su formación, la erosión hídrica laminar y concentrada, la acumulación de sedimentos dentro y fuera del complejo, los procesos gravitatorios como flujos y avalanchas, e incluso las manifestaciones hidrotermales se han manifestado de manera natural y en equilibrio, y forman parte del ciclo morfológico del complejo. Algunos otros como los bancos de extracción de material, la construcción de obras civiles y las vialidades, que podrían clasificarse como procesos antrópicos, aunque no cambian el paisaje general, sí están directamente relacionados con los cambios morfológicos del complejo, y lo hacen a un ritmo acelerado. Otros ejemplos son los incendios y la deforestación o cambio de uso de suelo.

La densidad de cárcavas o barrancas en todo el CVLP evidencia la importancia de la erosión laminar y concentrada en la modelación del paisaje actual. También la tienen los procesos de remoción en masa de tipo flujo, que presenta una gran densidad en la unidad vulcano-lacustre, y es precisamente esta unidad la que probablemente merece mayor atención de todo el complejo en cuanto a degradación de suelos, al mostrar características de mayor susceptibilidad y estar expuesta al posible desarrollo del proyecto geotermoeléctrico de Cerritos Colorados.

La cartografía a detalle de estos procesos morfodinámicos en el CVLP no se había desarrollado antes de este trabajo, por lo que no se cuenta con un antecedente adecuado para su comparación y discusión. Aun así, cabe mencionar el trabajo de González-Torreros y colaboradores (2018) que proponen un mapa geomorfológico con cartografía a detalle donde menciona morfologías por procesos de resurgencia-erosión y por procesos erosivos, sin embargo, el enfoque cartográfico de dicho trabajo no es comparable con nuestros resultados.

5.2 Estimación de la erosión hídrica en el Complejo Volcánico La Primavera

Los valores resultantes de la ecuación RUSLE para el escenario real son comparables con los estudios realizados por Díaz-Maldonado & Gómez-Martínez (1983), aunque haya algunas diferencias en cuanto a la metodología aplicada. Debido a que nuestro estudio se realizó mediante el uso de un SIG y de modelos compuestos de píxeles, hubo algunas celdas con valores de 0 t/ha*año, mientras que los autores reportan entre 8.44 y 10 t/ha*año como valor mínimo. Para los valores máximos, este estudio arrojó valores representativos de ~300 t/ha*año, en comparación con Díaz-Maldonado & Gómez-Martínez (1983) que reportaron entre 1500 y 1596 t/ha*año. Otra diferencia es el promedio de pérdida de suelo anual, siendo

reportado por Díaz-Maldonado & Gómez-Martínez (1983) un valor de 207.74 t/ha*año mientras en este estudio se obtuvo un valor de 15.68 t/ha*año.

Una de las razones que explica las diferencias en los valores máximos y los promedios se debe a las diferencias en la metodología de ambos trabajos, ya que mientras los autores Díaz-Maldonado & Gómez-Martínez utilizaron USLE, en este trabajo se utilizó la ecuación RUSLE, que es una versión revisada y mejorada de la USLE, la cual podría significar una sobreestimación en las pérdidas de suelo.

CONANP-SEMARNAT (2000) también menciona dos grados de erosión presentes en el CVLP (aunque no se menciona la metodología o cómo obtuvieron estos datos), una ligera de 10 t/ha*año que afecta el 27% de la superficie y otra moderada de hasta 50 t/ha*año que afecta al 73% restante. Si bien el valor mínimo concuerda con lo que reportaron Díaz-Maldonado & Gómez-Martínez (1983), el valor máximo es subestimado.

Correspondiente a los factores de la ecuación RUSLE que son determinantes en el aumento o disminución de la erosión hídrica real dentro del CVLP, la ecuación reflejó un cambio importante únicamente en las zonas en donde los valores de C (manejo y cobertura vegetal) fueron iguales o mayores a 0.042 (zonas con menor porcentaje de árboles y con cultivos anuales y permanentes), en donde la erosión fue de grado severa a catastrófica, mientras que para las zonas con valores de C menores a 0.042 (con 70 a 100% de cobertura de follaje de árboles y mantillo de más de 5 cm de espesor) el grado de erosión fue de moderada a normal. Esta asociación entre el factor C de valores cercanos a cero y la erodabilidad de los suelos confirma una vez más la importancia y relación entre la conservación de los bosques y los

suelos. Las zonas en las que la cobertura es forestal, los valores más altos de erosión estuvieron determinados por la topografía, más que por la erodabilidad del suelo o la erosividad de la lluvia, esta última no mostró ser visualmente significativa al menos dentro del CVLP. Por lo tanto, se determinó que los factores determinantes en la pérdida de suelo para el escenario real son el factor de manejo y cobertura vegetal y el de la topografía. Estas observaciones concuerdan con lo mencionado tanto por Díaz-Maldonado & Gómez-Martínez (1983) como por CONANP-SEMARNAT (2000).

En cuanto a los resultados de la ecuación RUSLE en el escenario potencial, el factor topográfico (LS) presenta mayor influencia. Esto se puede observar cuando comparamos unidades con el mismo valor de K. Por ejemplo, gran parte de los domos comparten el valor más bajo de K (0.022), sin embargo, a su vez forman parte de las zonas de mayor grado de erosión (>200 t/ha*año). Por el contrario, las zonas que tienen los valores más altos de K (0.031) presentan grados menores de erosión, lo que indica que la topografía es más importante que la erodabilidad del suelo y que la erosividad de la lluvia.

En cuanto al factor K y la clasificación de partículas de cada perfil muestreado, se tiene que los dos perfiles con mayor porcentaje de limos + arenas finas (LP03 y 04) obtuvieron un valor medio de K (0.024). Mientras que los dos perfiles con menor porcentaje de limos + arenas finas (LP08 y 16) obtuvieron valores de 0.024 y 0.022 respectivamente. Los dos perfiles que reportaron mayor porcentaje de arcillas (LP05 y 18) reportaron valores medio-altos de K (0.025 y 0.027, respectivamente), mientras que los que presentaron menor porcentaje de arcillas (LP08 y 13) reportaron un valor medio de K (ambos con 0.024). Esto

indicaría que los suelos con mayor contenido de arcilla en el CVLP tienden a ser más erodables que los que tienen poca arcilla o mayor contenido de limos + arenas finas.

En cuanto a la erosividad de la lluvia, se considera que el factor R no actúa como un determinante para explicar las variaciones presentadas en ambos escenarios (erosión hídrica real y potencial), debido a que no se obtuvieron datos meteorológicos locales para calcular dicho factor.

Si comparamos los porcentajes de superficie de cada grado de erosión que presenta el CVLP en cuanto al escenario real y el potencial la diferencia es muy marcada. Mientras que en el escenario real los rangos de 0 a 5 t/ha*año (normal y ligera) son los predominantes (78.81%), en el escenario potencial solamente ocupan el 3.7% de la superficie total del CVLP. Los rangos de 5 a 50 t/ha*año (moderada y severa) para el escenario real alcanza un 12.26%, mientras que en el potencial llegan a un 5.76%. Los dos últimos rangos, de 50 a >200 t/ha*año, se disparan en el escenario potencial, llegando a un 90.54%, mientras en el escenario real ocupan solamente un 8.93%, lo que muestra una relación inversa entre estos dos modelos (Figura 47).

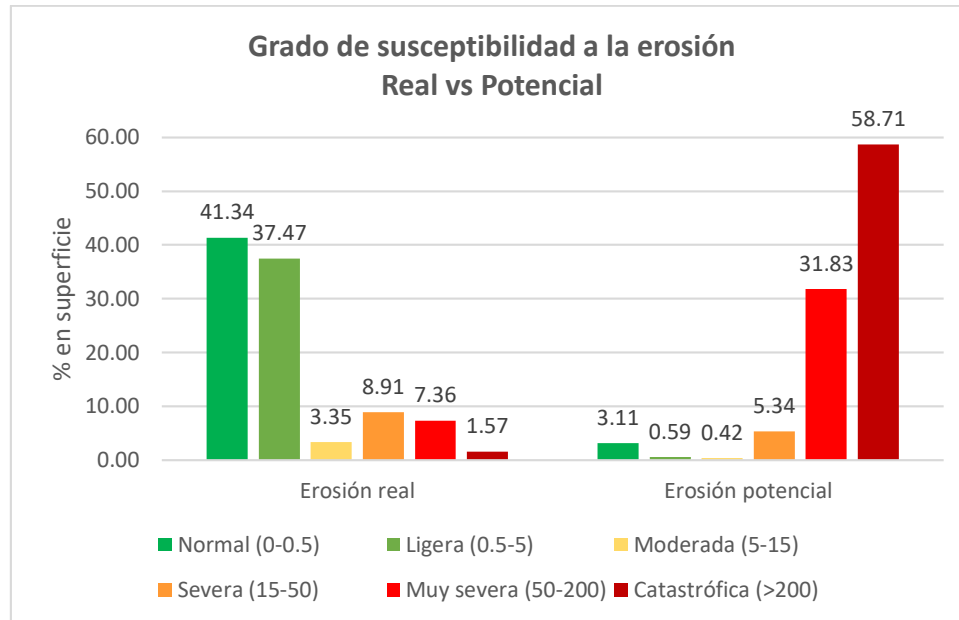


Figura 47. Gráfica del porcentaje de superficie ocupado por grado de severidad, modelo de erosión real contra modelo de erosión potencial.

Durante el desarrollo de este trabajo se ha mencionado el papel que juegan los incendios en la degradación y pérdida de los suelos. Pues bien, la hidrofobicidad (repelencia al agua en el suelo) es un efecto que puede causar mayor escurrimiento superficial y mayor erosión del suelo, y que puede ser desencadenado por los incendios (DeBano, 2000). De acuerdo con algunos autores citados por Jaramillo (2006) la vegetación es el principal aporte de sustancias que pueden generar repelencia al agua, y dentro de las especies vegetales que destacan por su aporte están el encino (*Quercus*) y el pino (*Pinus*), las dos especies arbóreas dominantes en el CVLP. Por lo tanto, además de dejar el suelo desprovisto de vegetación, los incendios pueden generar un efecto hidrofóbico en los suelos, provocando procesos hídricos de ladera más intensos y desfavorables para la conservación y desarrollo del suelo.

5.3 Comportamiento de la erosión hídrica en las unidades morfológicas del CVLP

La erosión laminar y concentrada afectan prácticamente a todas las unidades morfológicas del Complejo Volcánico La Primavera, sin embargo, no al mismo nivel. Mientras que en las unidades de flujo (domos, coladas y mantos) apenas se observan rasgos de erosión concentrada, las secuencias vulcano-lacustres y los flujos piroclásticos presentan una gran densidad de barrancas. Ya se han mencionado algunos de los factores que podrían contribuir a estas diferencias, por ejemplo, la litología o tipo de material parental de las unidades, la topografía, el control tectónico-estructural, la cubierta vegetal, alteraciones riolíticas por actividad hidrotermal y el tipo de uso de suelo. A continuación, se muestra un análisis comparativo entre las unidades morfológicas y los resultados cuantitativos de erosión hídrica de RUSLE real y potencial.

Escenario real

Como se mostró en el capítulo de resultados, la cubierta vegetal y los tipos de uso de suelo son mayormente determinantes en el grado de erosión de las unidades morfológicas, que la topografía presente en ellas, ya que a pesar de que los valores más altos de los factores LS corresponden a los bordes de las unidades de flujo y en la secuencia vulcano-lacustre, sus grados de erosión se mantienen mayormente en un rango de 0 a 5 t/ha*año (normal - ligero). Lo mismo ocurre en un 78.8% de la superficie del complejo. En contraste, las zonas con los grados más altos de erosión corresponden exactamente con los polígonos distribuidos por todo el complejo donde el factor C alcanza valores de 0.042 y superiores. El grupo de unidades morfológicas con los valores más altos de erosión real son el vulcanismo precaldera, el depósito de colapso volcánico y los flujos piroclásticos, con un promedio de 60.71, 34.46

y 23.38 t/ha (respectivamente). Por su parte, la secuencia vulcano-lacustre y las coladas de lava, tienen las estimaciones más bajas, con promedios de 12.92 y 4.40 t/ha, respectivamente. Con base a los resultados presentados en este trabajo, las observaciones de campo, y las evidencias obtenidas podemos decir que las diferencias de los promedios entre estos dos grupos de unidades se pueden relacionar con lo siguiente: el primer grupo de unidades (mayores promedios) comparten la mayoría de zonas de uso agrícola y zonas de árboles sin arbustos y pastizales, también se observaron suelos sin cobertura de mantillo orgánico, y en general son unidades con un nivel considerable de deforestación y donde las actividades antrópicas tienen mayor participación. Por su parte, en el segundo grupo de unidades (menores promedios) predomina la cobertura forestal, y aunque los valores del factor topográfico son mayores en estas dos unidades, mantienen suelos ricos en materia orgánica debido principalmente a la conservación de los bosques. De manera general se puede decir que, a pesar de la gran diversidad de unidades morfológicas y la hipótesis planteada al inicio de este trabajo, la cobertura vegetal y uso de suelo parecen ser los más determinantes en cuanto a la erosión hídrica real.

Escenario potencial

Haciendo a un lado el factor C (cobertura vegetal y uso de suelo), el escenario de erosión potencial para el CVLP se torna catastrófico, con más del 58% de la superficie con tasas de más de 200 t/ha, y profundidades erosionadas de hasta 43.11 mm por año. Como se puede observar en la figura 44 y en la tabla 15, pareciera que el patrón del escenario real se invierte y que las unidades en donde se presentaban las tasas más altas ahora contienen las zonas con los promedios más bajos (a excepción de la unidad de vulcanismo precaldera, que sigue

teniendo el más alto). Las unidades mayormente afectadas en este escenario son el vulcanismo precaldera, las coladas de lava, y la secuencia vulcano-lacustre, que morfológicamente corresponden a las zonas más altas y escarpadas del complejo volcánico. Este comportamiento inverso ocurre debido a que, al no tener en cuenta la cubierta vegetal, la topografía y el tipo de suelo son los factores determinantes. Si comparamos el modelo de erosión hídrica potencial contra los modelos de los factores LS y K, podemos observar que la distribución de las zonas con mayores tasas obedece mayormente al modelo de LS, más que al factor K. Si observamos el modelo de K, los polígonos con los valores más altos no tienen precisamente las mayores tasas de erosión, al contrario, predomina la erosión severa y muy severa (15-200 t/ha*año), pero no la catastrófica (>200 t/ha*año). En cuanto al factor topográfico, podemos comparar también el modelo de pendientes y el modelo RUSLE potencial, y darnos cuenta de que prácticamente, cualquier superficie que supera los 10° de inclinación obtiene tasas por encima de los 200 t/ha*año, y que sólo por debajo de ese grado la erosión hídrica es menor. Existen también pequeñas zonas en las que la erosión hídrica se comporta de manera ligera, y aunque no forman parte de las morfologías principales, éstas corresponden a pequeñas unidades morfológicas clasificadas como terrazas fluviales.

6. Conclusiones

El Complejo Volcánico La Primavera presenta una gran diversidad de procesos morfodinámicos (erosión hídrica, procesos de remoción en masa, alteración hidrotermal), sin embargo, los que predominan y los que tienen mayor efecto son la erosión hídrica laminar y concentrada.

Se identificaron ocho tipos de patrón de drenaje diferentes, predominando el anguloso subdendrítico y el subparalelo. La unidad con la densidad de drenaje más alta es la secuencia vulcano-lacustre. Esta misma unidad morfológica, presenta el mayor número de procesos de remoción en masa, puntos de alteración hidrotermal, y rasgos de mayor susceptibilidad a los procesos exógenos (naturales y antrópicos).

La erosión hídrica en el CVLP, actualmente es un proceso natural que conlleva a la pérdida de hasta 60.71 t/ha*año y hasta 5.02 mm de suelo anual, aunque en más de un 78% de la superficie predomina la erosión de tipo normal y ligera (0-5 t/ha*año).

En el escenario real de la ecuación RUSLE, el factor predominante es la cobertura vegetal (factor C), y en segundo lugar la topografía (factor LS). Para este mismo escenario, la unidad con la tasa promedio anual de erosión más alta es el vulcanismo precaldera, y la de menor promedio anual es la unidad de colada de lava con 4.40 t/ha*año.

En el escenario potencial, sin la cubierta forestal actual las tasas de erosión aumentarían por encima de las 200 t/ha*año en un 58.71% de la superficie del CVLP, y se perderían hasta 43.11 mm de suelo anuales. En este escenario, el modelo de erosión refleja la importancia

que tiene el factor topográfico (LS) sobre el grado de erosión hídrica en el Complejo Volcánico La Primavera, poniendo en segundo lugar al factor K (erodabilidad del suelo).

Mientras la vegetación actual se conserve, el grado de erosión predominante en el CVLP será normal, del orden de 0 a 0.5 t/ha*año.

El Complejo Volcánico La Primavera es un área natural en constante presión y amenaza ecológica, y se propone el siguiente orden jerarquizado, por grado de amenaza, de sus principales problemas ambientales: 1. Cambio de uso de suelo (deforestación), 2. Incendios, 3. Erosión hídrica, 4. Vertederos de basura, y 5. Extracción de material geológico. Con base en esta propuesta y a los resultados, se piensa que la unidad morfológica más vulnerable a la degradación del suelo es la secuencia vulcano-lacustre, debido a características como, su material parental y tipo de suelo (oleadas piroclásticas y caída de pómez en sus capas superiores), su topografía agreste y altas pendientes, su densidad de drenaje, el control tectónico-estructural, el intemperismo por manifestaciones hidrotermales y fumarolas, y el posible reinicio del proyecto Campo Geotérmico Cerritos Colorados.

En cuanto a la hipótesis planteada en este trabajo, los resultados obtenidos la sustentan en un escenario en donde la vegetación se ve disminuida, por ejemplo, el caso del modelo RUSLE para el escenario potencial. Cuando la capa superficial del suelo en La Primavera se ve desprovisto de vegetación se observa que los factores principales que determinan el grado de pérdida de suelo son la topografía y las características del suelo.

A manera de recomendación, se sugiere realizar análisis de pérdida de suelos a microescala sobre las unidades con mayor vulnerabilidad, e incluso mediciones o estimaciones con métodos directos en el campo.

Referencias citadas

- Aguirre-Díaz, G.J. (1996). Volcanic stratigraphy of the Amealco caldera and vicinity, central Mexican Volcanic Belt. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 3, núm. 1, p. 10-51.
- Almaguer, J., Lopez-Loera, H., Macias, J. L., Saucedo, R., Yutisis, V., Guevara, R. (2019). Geophysical modeling of La Primavera caldera and its relation to volcanology activity based on 3D susceptibility inversion and potential data analysis. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, VOLGEO 6556.
- Amezquita, E., & Silva, F. (1990). El agua y la erodabilidad de los suelos. *Fundamentos para la Interpretación de Análisis de Suelos, Plantas y Aguas para riego*. Bogotá: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, 128-136.
- Banwell, C. J., & Valle, R. G. (1970). Geothermal exploration in Mexico 1968–1969. *Geothermics*, 2, 27-40.
- Bolós, X., Cifuentes, G., Macías, J. L., Sosa-Ceballos, G., Garcia-Tenorio, F., & Albor, M. (2019). Geophysical imaging of fluid circulation and its relation with the structural system of Cerritos Colorados geothermal field, La Primavera caldera (Mexico). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 369, 238-249.
- Cervantes, F. R. (2009). Proyecto de aprovechamiento geotérmico en el bosque La Primavera por la CFE. VIII Congreso Nacional de Tecnología Ambiental, p.27, 33, 35.
- CONAGUA. Comisión Nacional del Agua. (2021). Normales Climatológicas por Estado. Consultado en: <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=jal>. Consultado por última vez: 14 abril de 2022.
- CONANP-SEMARNAT. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. (2000). Programa de Manejo Área de Protección de Flora y Fauna La Primavera, México. 1ª edición, CONANP-SEMARNAT.
- Cortés T., H. G. (1991). Caracterización de la erosividad de la lluvia en México utilizando métodos multivariados. Tesis de maestría en ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Méx. 168 p.
- DeBano, L. F. (2000). The role of fire and soil heating on water repellency in wildland environments: a review. *Journal of hydrology*, 231, 195-206.
- Desmet, P.J. & Govers, G. (1996). A GIS-procedure for the automated calculation of the USLE LS-factor on topographically complex landscape units. *J. Soil and Water Conservation*, 51: 427-433.
- Díaz-Maldonado, E. R. A. (1983). La erosión hídrica en el bosque de La Primavera, Jalisco: efecto de la cubierta vegetal y la lluvia. Universidad de Guadalajara, p. 25-48.

- Dorantes-Zavaleta, R. L. (2018). ANÁLISIS BIOESTRATIGRÁFICO Y PALEOAMBIENTAL DE LA CALDERA LA PRIMAVERA, JALISCO. Tesis de maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Michoacán, México, febrero 2018.
- Dumas-Salazar, Á. (2012) Riesgo de erosión hídrica en la cuenca hídrica del Río Mundo. Maestría en Tecnologías de la Información Geográfica. Noviembre 2012.
- FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (1980). Metodología provisional para la evaluación de la degradación de suelos. FAO. Roma. 86 p.
- FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2015). Base referencial mundial para el recurso suelo, actualización 2015. FAO. Roma, Italia.
- Ferrari, L. (2000). Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 53(1), 84-92.
- Ferrari, L., Nelson, S. A., Rosas-Elguera, J., Aguirre-Díaz, G., and VenegasSalgado, S. (1997). Tectonics and volcanism of the western Mexican Volcanic Belt: in Aguirre-Díaz, G., Aranda-Gomez, J., CarrascoNuñez, G., and Ferrari, L., eds., Magmatism and tectonics in central and northwestern Mexico—A selection of the 1997 IAVCEI General Assembly excursions, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, p. 85–29.
- Ferrari, L., Rosas-Elguera, J., Márquez, A., Oyarzun, R., Doblaz, M., & Verma, S. P. (1999). Alkalic (ocean-island basalt type) and calc-alkalic volcanism in the Mexican volcanic belt: A case for plume-related magmatism and propagating rifting at an active margin?: Comment and Reply. *Geology*, 27(11), 1055-1056.
- Figuroa, S. B., Amante, O. A., Cortés, T. H. G., Pimentel, L. J., Osuna, C. E. S., Rodríguez, O. J. M., & Morales, F. F. J. (1991). Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión. CP-SARH. México.
- Flores-Delgadillo L. & Alcalá-Martínez J. R. (2010). Manual de Procedimientos Analíticos. Universidad Autónoma de México. Instituto de Geología. Departamento de Edafología.
- Foster, G. R., Meyer, L. D., & Onstad, C. A. (1977). A runoff erosivity factor and variable slope length exponents for soil loss estimates. *Transactions of the ASAE*, 20(4), 683-0687.
- García, E. & CONABIO. (1998) “Climas (Clasificación de Koeppen, modificada por García)” Escala 1:100 000. México, 1998.
- Gómez-Álvarez, F. (2015). Análisis Petrológico de los Domos Tajo y Colli e Implicaciones en el Potencial Geotérmico del Complejo Volcánico La Primavera (CVLP), Jalisco. Tesis de licenciatura. Instituto Tecnológico Superior de Tacámbaro, p. 30-35, 72.
- Gómez-Martínez, J. F. (1983). Pérdida de suelo por erosión hídrica en la zona forestal de La Primavera, Jalisco: Influencia de la topografía y características del suelo. Universidad de Guadalajara, p. 26-65.

- González-Torreros, L., Valdivia-Ornelas, L., Gómez Sención, J. H. (2018). Diversidad volcánica y geopatrimonio en La Sierra La Primavera. 1ª edición, Universidad de Guadalajara.
- Hobson, R. D. (1967). FORTRAN IV programs to determine surface roughness in topography for the CDC 3400 computer. University of Kansas.
- Hobson, R. D. (1972). Surface roughness in topography: quantitative approach. *Spatial analysis in geomorphology*, 221-245.
- Howard, A. D. (1967). Drainage analysis in geologic interpretation: a summation. *AAPG bulletin*, 51(11), 2246-2259.
- Huerta-Martínez, F. M., e Ibarra-Montoya, J. L. (2014). Incendios en el bosque La Primavera (Jalisco, México): un acercamiento a sus posibles causas y consecuencias. *CienciaUAT*, 9(1), 23-32.
- INEGI. (2010). Red hidrográfica escala 1: 50 000. Edición 2.0, subcuena hidrográfica RH12Eb.
- INEGI. (2010). Red hidrográfica escala 1: 50 000. Edición 2.0, subcuena hidrográfica RH12Dc.
- INEGI. (2010). Red hidrográfica escala 1: 50 000. Edición 2.0, subcuena hidrográfica RH14Ab.
- INEGI. (2010). Red hidrográfica escala 1: 50 000. Edición 2.0, subcuena hidrográfica RH12Ec.
- INEGI. (2013). Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación escala 1:250 000, carta F13-12.
- INEGI. (2013). Conjunto de datos vectoriales edafológicos escala 1: 250 000, carta F13-12.
- Jaramillo, J. D. F. (2006). Repelencia al agua en suelos: una síntesis. *Rev. Acad. Colomb. Cienc*, 30(115), 215-232.
- Luhr, J. F., & Lazaar, P. (1985). The southern Guadalajara volcanic chain, Jalisco, Mexico. *Geofísica Internacional*, 24(4).
- Maciel-Flores, R., & Rosas-Elguera, J. (1992). Modelo geológico y evaluación del campo geotérmico La Primavera, Jal., México. *Geofísica Internacional*, 31(4).
- Mahood, G. A. (1977). A preliminary report on the comenditic dome and ash flow complex of Sierra La Primavera, Jalisco. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 1(2), 177-190.
- Mahood, G. A. (1980). Geological evolution of a Pleistocene rhyolitic center—Sierra la Primavera, Jalisco, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 8(2-4), 199-230.

- Mahood, G. A., & Truesdell, A. H. (1983). A reconnaissance geochemical study of La Primavera geothermal area, Jalisco, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 16(3-4), 247-261.
- McCool, D. K. *et al.* (1989). Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation. *Transactions of ASAE* 32: 1571-1576.
- Moges, D. M., & Bhat, H. G. (2017). Integration of geospatial technologies with RUSLE for analysis of land use/cover change impact on soil erosion: case study in Rib watershed, north-western highland Ethiopia. *Environmental Earth Sciences*, 76(22), 765.
- Nájera-González, O., Bojórques-Serrano, J., Flores-Vilchez, F., Murray-Núñez, R. M., González García-Sancho, A. (2016). RIESGO DE EROSIÓN HÍDRICA Y ESTIMACIÓN DE PÉRDIDA DE SUELO EN PAISAJES GEOMORFOLÓGICOS VOLCÁNICOS EN MÉXICO. *Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas*, vol. 37, no. 2, p. 45-55.
- Osti, C. L., López, S. B., Sánchez, F. M., & Domínguez, M. C. (2007). Riesgo a la erosión hídrica y proyección de acciones de manejo y conservación del suelo en 32 microcuencas de San Luis Potosí (No. 333.73097244 R5).
- Pando-Moreno, M., Gutiérrez Gutiérrez, M., Maldonado Hernández, A., Palacio Prieto, J. L., & Estrada Castellón, A. E. (2003). Comparación de métodos en la estimación de erosión hídrica. *Investigaciones geográficas*, (51), 23-36.
- Priego, S. A., Bocco, G., Mendoza, M., Garrido, A. (2008). Propuesta para la generación semiautomatizada de unidades de paisajes: Fundamentos y métodos. SEMARNAT-INECIGA-UNAM.México.
- Priego-Santander. A., *et. al.* (2010). Propuestas para la generación semiautomatizada de unidades de paisaje. *Planeación Territorial. Colecciones CIGA*. Pp. 108.
- Rackham, L. J. (1973). Notes to Accompany Land Unit Geomorphology Description Card. Land Resources Division, Tolworth.
- Renard, K. G. (1997). Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). United States Government Printing.
- Rivera-Olguín, E. (2016). Historia eruptiva del Volcán Planillas: vulcanismo postcaldera en la caldera de La Primavera, Jal. Tesis de maestría. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Mayo de 2016.
- Rosas-Elguera, J., Ferrari, L., Garduño-Monroy, V. H., & Urrutia-Fucugauchi, J. (1996). Continental boundaries of the Jalisco block and their influence in the Pliocene-Quaternary kinematics of western Mexico. *Geology*, 24(10), 921-924.
- Rossotti, A., Ferrari, L., Martínez, M. L., & Elguera, J. R. (2002). Geology of the boundary between the Sierra Madre Occidental and the Trans-Mexican Volcanic Belt in the Guadalajara region, western Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 19(1), 1-15.

Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México*. 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, 504 pp.

Saucedo-Velázquez, J. I. (2017) *Propuesta para el desarrollo de un Proyecto Geotérmico Sustentable en el Bosque de la Primavera, Jalisco*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, p. 21, 94.

SEMARNAT. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2002). *Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis*.

Siebe, C., & Jahn, R. (1996). *Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo* (No. Folleto 15842).

Siebert, L., Glicken, H., & Ui, T. (1987). *Volcanic hazards from Bezymianny-and Bandai-type eruptions*. *Bulletin of Volcanology*, 49(1), 435-459.

Singh, G., & Panda, R. K. (2017). *Grid-cell based assessment of soil erosion potential for identification of critical erosion prone areas using USLE, GIS and remote sensing: A case study in the Kapgari watershed, India*. *International Soil and Water Conservation Research*, 5(3), 202-211.

Sourisseau, D., Macías, J. L., García-Tenorio, F., Ramón-Avellán, D., Saucedo-Girón, R., Bernal, J. P., Arce-Saldaña, J. L., Tinoco-Murillo, Z. (2020). *New insights into the stratigraphy and 230Th/U geochronology of the post-caldera explosive volcanism of La Primavera caldera, Mexico*. *Journal of South American Earth Sciences*, 103 (2020) 102747.

Strahler, A. N. (1952). *Hypsometric (área-altitude) analysis of erosional topography.*, *Bull Geol. Soc. Amér.*, Vol. 63, 1952, pp. 1117-1142.

Tinoco-Murillo, Z. S. (2017). *Génesis y mecanismos de emplazamiento de la pómez gigante de la caldera de La Primavera, Jalisco*. Tesis de maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, p. 32.

Wallace, P., Carmichael, I. S., Richter, K., & Becker, T. A. (1992). *Volcanism and tectonism in western Mexico: A contrast of style and substance*. *Geology*, 20(7), 625-628.

Weigand, P. C. (2012). *The Coli Volcano and its Neighbor, Guadalajara*. *Relaciones. Estudios de historia y sociedad*, 33(129), 291-318.

Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1965). *Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains: Guide for selection of practices for soil and water conservation* (No. 282). US Department of Agriculture.

Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning* (No. 537). Department of Agriculture, Science and Education Administration.

Wischmeier, W. H., Johnson, C. B., & Cross, B. V. (1971). Soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *Journal of soil and water conservation*.

Wright, J. V. (1981). The Rio Caliente ignimbrite: Analysis of compound intraplinian ignimbrite from a major Late Quaternary Mexican eruption. *Bull. Volcanol.*, 44: 189-212.

Yokoyama, I., & Mena, M. (1991). Structure of La Primavera caldera, Jalisco, Mexico, deduced from gravity anomalies and drilling results. *Journal of volcanology and geothermal research*, 47(1-2), 183-193.

Índice de figuras

	Página
<i>Figura 1.</i> Vegetación, fauna y belleza natural del Complejo Volcánico La Primavera.	6
<i>Figura 2.</i> Vista del macrolibramiento, al oeste del CVLP, el cual corta perpendicularmente a la unidad de flujos piroclásticos (Toba Tala).	7
<i>Figura 3.</i> Área afectada por un incendio en 2018, donde se observa que el fuego dañó el arbolado que existía y eliminó la capa superficial de ojarasca. Imagen tomada en abril 2018.	9
<i>Figura 4.</i> Mapa de localización del CVLP. a) Ubicación de la zona de estudio dentro de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) y Sierra Madre Occidental (SMOc). b) Rasgos topográficos más importantes en el contexto regional, y algunas estructuras geológicas relevantes como el volcán Tequila y la Sierra San Juan Cosala. Sistema de coordenadas: GCS WGS 1984.	22
<i>Figura 5.</i> Climograma de la estación meteorológica de Zapopan, cercana al CVLP, que muestra el temporal de lluvias que inicia en el mes de junio y se puede extender hasta el mes de octubre, siendo el mes de mayo que en promedio presenta la mayor temperatura y enero la menor (CONAGUA, 2021).	23
<i>Figura 6.</i> Bosque de encino sobre las faldas del domo Cerro Alto. Tomada en abril de 2018.	24
<i>Figura 7.</i> Vista panorámica de la vegetación del CVLP tomada desde el domo Las Planillas, se observa mayormente un bosque de pino/encino, con una zona agrícola en la parte baja, al fondo el domo San Miguel. Tomada en abril de 2018.	24
<i>Figura 8.</i> Cobertura vegetal y uso de suelo del CVLP basado en INEGI (2013) e imágenes satelitales (Google Earth, 2019). Sistema de coordenadas: UTM WGS84 Zona 13N.	25
<i>Figura 9.</i> Mapa hidrográfico del CVLP donde se aprecian las cuatro subcuencas que lo conforman: R. Verde-P. Santa Rosa (RH12Eo), Río Salado (RH14Ab), R. Corona-R. Verde (RH12Eb) y Laguna San Marcos (RH12Dc); así como los ríos más importantes dentro del complejo.	28
<i>Figura 10.</i> Modelo de inclinación de la pendiente en grados. Se observan claramente los límites de las unidades morfológicas propuestas	30

en la figura 22. Clasificación con base en Priego Santander *et al.* (2010).

- Figura 11.* Ejemplo del grado de inclinación de algunas laderas. Tomada en el domo Pedernal en abril de 2018. 31
- Figura 12.* Modelo de amplitud del terreno con diferencia de altitud por cada 500 m², la clasificación de unidades del paisaje fue con base en Ángel Priego *et al.* (2008). * Dentro del área de estudio no figuran valores menores o iguales a 2.5 m/0.5 km². 32
- Figura 13.* Modelo de rugosidad del terreno, basado en Hobson (1967, 1972). Las zonas más oscuras corresponden a las más homogéneas topográficamente, y donde hay más variabilidad de grises y blancos la topografía es más heterogénea. 33
- Figura 14.* Mapa del marco tectónico-geológico regional. Se muestra la localización del CVLP dentro de las provincias fisiográficas del Eje Neovolcánico y la Sierra Madre Occidental, así como dentro de la dinámica tectónica del Bloque Jalisco (Modificado de Bolós *et al.*, 2019). VC, Volcán de Colima; NC, Nevado de Colima; Cn, Cantaro; Tq, Tequila; Cb, Ceboruco; SP, San Pedro; Tp, Tepetitlic; S, Sanganguey; N, Navajas; SJ, San Juan; CVLP, Complejo Volcánico La Primavera; PN, Placa Norteamericana; PP, Placa del Pacífico; PR, Placa de Rivera; PC, Placa de Cocos. Sistema de coordenadas: GCS WGS 1984. 35
- Figura 15.* Columnas estratigráficas generales. *La columna local se basó en la secuencia propuesta por Mahood, sin embargo, se propone que el depósito de avalancha ocurrió durante la evolución del domo Q (Planilla) y no a un evento precaldera como se ha mencionado en algunos trabajos (Mahood, 1980; Maciel-Flores & Rosas-Elguera, 1992). La datación del paleolago corresponde al trabajo de Dorantes-Zavaleta (2018). 36
- Figura 16.* Corte estratigráfico en una de las barrancas dentro del depósito de la toba Tala, en la base se aprecian las chimeneas características de esta unidad. Tomada en abril de 2018. 39
- Figura 17.* Secuencia vulcano-lacustre: PG, Depósito de la Pómez Gigante; DL, Depósitos lacustres; y FP, Flujos piroclásticos (Toba Tala). La Dra. Lourdes como escala, tomada en abril de 2018. 39
- Figura 18.* El Dr. Víctor H. Garduño[†] explicando el comportamiento de las microfallas que afectaron los sedimentos lacustres, en corte de 40

la secuencia vulcano-lacustre en la porción del lago Norte.
Tomada en julio de 2016.

- Figura 19.* Cartografía de las unidades y estructuras que conforman la evolución geocronológica del Complejo Volcánico La Primavera. A) Geocronología de eventos propuesta por Mahood (1980). B) Mapa de la geología simplificada del complejo (Tomada de Maciel-Flores & Rosas-Elguera, 1992; consultar trabajo para ver detalle). 41
- Figura 20.* Vista panorámica desde la cima del domo Cerro Alto donde se aprecian las barrancas que caracterizan a la unidad sur. Tomada en abril de 2018. 44
- Figura 21.* Fotografía aérea del domo El Tajo, donde se resaltan los flujos de lava que lo conforman. Tomada en mayo de 2019 por el Dr. Arturo Muñiz. 46
- Figura 22.* Mapa geomorfológico general del CVLP. Este mapa es parte del análisis hecho en este trabajo, que si bien toma como base lo propuesto por Mahood (1980), pero se da un enfoque geomorfológico a las unidades y a la leyenda. 47
- Figura 23.* Perfiles topográficos del Complejo Volcánico La Primavera. Los perfiles muestran la topografía de cada una de las unidades morfológicas mencionadas en el texto anterior, no buscan esclarecer la sección geológica del complejo, por lo tanto, sus espesores, su morfología interna, así como los ángulos y profundidades de las fallas son esquemáticas. 48
- Figura 24.* Jerarquización de la leyenda del mapa morfodinámico. Los pilares de la leyenda son los procesos exógenos predominantes y las morfologías resultantes o afectadas por estos procesos. 51
- Figura 25.* Mapa de unidades geopedológicas. En la leyenda, se muestran las características de clima (PPM, precipitación media anual), el tipo de cubierta (vegetal y uso de suelo), y topografía (unidad morfológica), de cada unidad geopedológica. También se muestran los sitios de muestreo y sus claves. Abreviaturas del tipo de cobertura: A-P-F= Agrícola-Pecuaria-Forestal, VI= Vegetación inducida, BC= Bosque de coníferas, BE= Bosque de encino. Abreviaturas de unidad morfológica: DCV= Depósito de colapso volcánico, CDPC= Conos y domos precaldera, FP= Flujos piroclásticos, D= Domo, CL= Colada de lava, ML= Manto de lava, DVL= Depósitos vulcano-lacustres. 54

<i>Figura 26.</i>	Imágenes de medición y obtención de muestras de suelo. Nótese la capa de casi 10 cm de hojarasca en este punto de muestreo.	55
<i>Figura 27.</i>	Procedimiento de eliminación de materia orgánica a muestras de suelo (fotos de izquierda a derecha): muestra seca tamizada a 2mm; muestra tratada con peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂); muestra limpia de materia orgánica.	57
<i>Figura 28.</i>	Nomograma del factor K en unidades del SI (Wischmeier <i>et al.</i> , 1971).	58
<i>Figura 29.</i>	Diagrama de flujo para la elaboración del modelo de los factores L y S.	60
<i>Figura 30.</i>	Mapa morfodinámico del Complejo Volcánico La Primavera. Se muestran los procesos exógenos naturales relacionados a la denudación y modificación de las geoformas, así como algunos rasgos antrópicos de impacto.	64
<i>Figura 31.</i>	Planicie de depósitos fluviales con topografía prácticamente plana o de muy baja pendiente. Esta zona en particular es de las más extensas y es utilizada para cosecha de temporal. Tomada en agosto de 2018.	68
<i>Figura 32.</i>	Suelo con rasgos de erosión hídrica laminar. Las flechas indican la dirección de la pendiente.	69
<i>Figura 33.</i>	a) Imagen satelital donde se aprecia la densidad de flujos de suelo sobre la secuencia vulcano-lacustre (superficies claras). Imagen de Google Earth de 2005. b) Imagen satelital de la morfología de flujo, las flechas indican la dirección de la pendiente. Este flujo en particular se encuentra sobre la ladera Sur del domo Cerro Alto (captura tomada de Google Earth).	70
<i>Figura 34.</i>	Borde de una de las plataformas de pozos geotérmicos donde se puede apreciar erosión de tipo remontante en la base del muro falso.	71
<i>Figura 35.</i>	Banco de material donde se extrae material ignimbrítico (Toba Tala). Tomada en agosto 2018.	72
<i>Figura 36.</i>	Mapa de erosividad de la lluvia del CVLP, en el cual se sobrepusieron los polígonos de las unidades morfológicas para ubicar mejor las zonas de mayor erosividad. La clasificación de los valores corresponde a los propuesto por Mannaerts (1999).	73

<i>Figura 37.</i>	Factor K en el CVLP. La numeración del 1 al 14 corresponden a las unidades pedogenéticas muestreadas en campo. Sistemas de coordenadas: UTM WGS84 Zona 13N.	74
<i>Figura 38.</i>	Porcentajes de limos + arenas finas y de arcillas para los horizontes superiores de cada perfil de suelo.	75
<i>Figura 39.</i>	Mapa del factor LS del CVLP. Sistemas de coordenadas: UTM WGS84 Zona 13N.	76
<i>Figura 40.</i>	Mapa del factor C. Sistema de coordenadas: UTM WGS84 Zona 13N.	77
<i>Figura 41.</i>	Modelo de erosión hídrica real del Complejo Volcánico La Primavera.	79
<i>Figura 42.</i>	Grafica de la tasa de erosión real promedio anual contra unidad volcánica.	80
<i>Figura 43.</i>	Gráfica del porcentaje de superficie ocupado por grado de severidad de la erosión real sobre cada unidad volcánica.	82
<i>Figura 44.</i>	Modelo de erosión hídrica potencial del Complejo Volcánico La Primavera.	83
<i>Figura 45.</i>	Gráfica de la tasa de erosión potencial promedio anual contra unidad volcánica.	84
<i>Figura 46.</i>	Gráfica del porcentaje de superficie ocupado por grado de severidad de la erosión potencial sobre cada unidad volcánica.	86
<i>Figura 47.</i>	Gráfica del porcentaje de superficie ocupado por grado de severidad, modelo de erosión real contra modelo de erosión potencial.	93

Índice de tablas

	Página
Tabla 1. <i>Porcentajes de área ocupada por los diferentes tipos de cobertura vegetal y uso de suelo (INEGI, 2013).</i>	25
Tabla 2. <i>Insumos cartográficos durante el análisis geomorfológico.</i>	49
Tabla 3. <i>Instrumentos y material utilizado para el cálculo del factor R.</i>	52
Tabla 4. <i>Clasificación de la erosividad de las lluvias según el valor de R (modificado de Mannaerts, 1999).</i>	53
Tabla 5. <i>Unidades geopedológicas del CVLP.</i>	53
Tabla 6. <i>Clases por contenido de materia orgánica en suelos.</i>	56
Tabla 7. <i>Códigos de permeabilidad.</i>	57
Tabla 8. <i>Valores de C para las diferentes coberturas.</i>	61
Tabla 9. <i>Categorías de riesgo* de erosión en cuanto a la pérdida del suelo anual (FAO, 1980).</i>	62
Tabla 10. <i>Porcentaje del área ocupada por cada unidad volcánica en el CVLP.</i>	65
Tabla 11. <i>Predominancia de los valores de C según porcentaje de cobertura.</i>	77
Tabla 12. <i>Porcentajes de superficie ocupada por cada una de las categorías de susceptibilidad de erosión real en el CVLP. El área considerada para este cálculo incluye zonas de depósito aluvial-coluvial, terrazas fluviales y barrancas.</i>	78
Tabla 13. <i>Valores de erosión real anual por unidad volcánica.</i>	81
Tabla 14. <i>Porcentajes de superficie ocupada por cada una de las categorías de susceptibilidad de erosión potencial en el CVLP. El área considerada para este cálculo incluye zonas de depósito aluvial-coluvial, terrazas fluviales y barrancas.</i>	83
Tabla 15. <i>Valores de erosión potencial anual por unidad volcánica.</i>	85