UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN GEOGRAFÍA

Predicción de la susceptibilidad por deslizamientos en el Sistema Hidrológico Necaxa, Puebla, México.

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
Maestro en Geografía

PRESENTA:
Frank Gustavo García Rodríguez

DIRECTOR DE TESIS
Dr. José Ramón Hernández Santana
Instituto de Geografía, UNAM

Ciudad Universitaria, Ciudad de México, enero de 2017

Universidad Nacional Autónoma de México
UNAM
Biblioteca Central
Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos.

El grado de dificultad que encuentra un autor de trabajos de esta índole se le añaden los contextos y las personas que lo rodean. Dado el tiempo de realización de esta investigación, muchos amigos y camaradas han compartido conocimientos y aportado paciencia al autor de esta obra.

Quiero agradecer a mi asesor, Dr. José Ramón Hernández Santana por su gentileza durante todo este tiempo. A los sinodales, Dr. Jesús Manuel Macías Medrano; Dr. José Juan Zamorano Orozco; Dr. José Gasca Zamora y a la Dra. Lucia Guadalupe Matías Ramírez por sus críticas certeras y palabras de aliento. A mis amigos del Instituto de Investigaciones Eléctricas: Dr. Luis Eduardo Pérez Rocha, Dr. Alberto López López, Dr. Ulises Mena, Ing. Francisco Valencia, Mtros. Lorena, Misael y Marcos. ¡Gracias!

Especial lugar ocupan en mis afectos, la Dra. Luisa Íñiguez Rojas, la Dra. Patricia Gómez Rey y Anuar Malcon Álvarez por las admoniciones y la fidelidad. Quien resulta una presencia constante, es el Ing. José Arturo Montiel Rosado (1962 – 2014), brillante geólogo y entrañable amigo.

A mi esposa Yoloxóchitl, su cariño, comprensión y asertividad en la revisión del texto. A Frank, mi hijo, …" por tomar el cielo por asalto".

"La gratitud, como las flores, no se da en la altura, mejor reverdece en la tierra buena de los humildes". José Martí, poeta.

I. INTRODUCCIÓN. 5

I.1 ACTUALIDAD CIENTÍFICA DEL TEMA Y MOTIVACIÓN. 12

I.2. HIPÓTESIS. 13

I.3. OBJETIVOS 13

I.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS. 13

I.5. PREGUNTAS DE LA INVESTIGACIÓN. 14

I.6. ESTRUCTURA DEL TRABAJO 15

II. MARCO TEÓRICO DEL ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD Y RIESGOS. 17

II.1 ANTECEDENTES. 17

II.2. APROXIMACIONES METODOLÓGICAS PARA LA EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR RIESGOS GEOMORFOLÓGICOS. 29

II.3. MARCO CONCEPTUAL PARA EL ESTUDIO DE LA SUSCEPTIBILIDAD MEDIANTE LA MINERÍA DE DATOS. 46

II.4. ANÁLISIS DE LOS DESLIZAMIENTOS POR MINERÍA DE DATOS. 49

II.5. PRECISIÓN DEL MODELO DE DATOS. 55

II.6. LOS ALGORITMOS DE LA MINERÍA DE DATOS PARA EL MODELADO ESTADÍSTICO. 60

III. CARACTERIZACIÓN FÍSICO-GEOGRÁFICA DEL ÁREA. 63

III.1 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL Y TECTÓNICA. 67

III.2. ESTRATIGRAFÍA Y LITOLOGÍA. 68

III.3. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL. 80

III.4. CLIMAS. 84

III.5. TIPOS CLIMÁTICOS. 88

III.6. EDAFOLOGÍA. 95

III.7. VEGETACIÓN Y FLORA. 100

IV. ANÁLISIS DE LOS DATOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LOS ESCENARIOS DE SUSCEPTIBILIDAD. 107

IV.1 ETAPAS DE TRABAJO. 107

V. EVALUACIÓN DE LOS MODELOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS. 152

V.1. TIPOLOGÍA MORFOGENÉTICA. 152

V.2. MODELOS ESTADÍSTICOS. 162

VI. CONCLUSIONES. 196

BIBLIOGRAFÍA. 199

Resumen.

La tesis aborda el análisis geomorfológico y la validación de nuevos elementos metodológicos provenientes de la minería de datos y el reconocimiento de patrones para mejorar el conocimiento sobre los procesos de riesgos de remoción en masa en el área del Sistema Hidroeléctrico Necaxa, como base para su predicción probabilística efectiva a futuro. Para ello, se emplearon métodos de investigación de campo y de gabinete, matemático-estadísticos y geotecnológicos contemporáneos, así como la fotointerpretación de fotos aéreas e imágenes de satélite y la implementación y procesamiento de la información en plataformas de sistemas de información geográfica.

Se construyeron cuatro modelos estadísticos probabilísticos: el Índice de Frecuencia; el Índice de Entropía; el algoritmo CART y el algoritmo MARS con resultados satisfactorios evaluados mediante la validación cruzada y el área bajo la curva característica del receptor. Esto permitió la comparación de los cuatro métodos estadísticos, brindando capacidad para la predicción probabilística de los modelos y diseño de mapas de susceptibilidad a deslizamientos y flujos de materiales en el territorio.

I. Introducción.

En los últimos 25 años, la práctica de diversas disciplinas académicas ha prestado especial interés para explicar el origen, comportamiento y consecuencias de los riesgos provocados por el movimiento gravitacional de rocas, suelos y detritos, comúnmente llamados *deslizamientos*. El incremento del número de artículos en revistas y libros de carácter científico es un ejemplo de la actividad desplegada por las diferentes comunidades académicas[1].

El objetivo primordial de los estudios se enfoca en la protección de la población, la economía y el medio ambiente contra los probables daños causados por estos fenómenos, por lo que la aseveración de M. Crozier y T. Glade[2] resulta pertinente, cuando afirman que se requiere de una evaluación precisa de los niveles de amenaza de los deslizamientos como medida objetiva, reproducible, justificable y significativa del riesgo. En este sentido, el riesgo se materializa como un evento de consecuencias calamitosas que puede ocurrir en el futuro.

Sin embargo, las investigaciones sobre los deslizamientos poseen características particulares que se diferencian de otros estudios sobre riesgos[3]. Los deslizamientos son fenómenos locales que se producen en diferentes contextos físico-geográficos; pueden originarse por una variedad de mecanismos que afectan una amplia gama de litologías que modifican el comportamiento posterior de las mismas, así como la capacidad de destrucción del evento. Además, la gestión de riesgo por deslizamiento difiere entre países, pues tiene sus orígenes en cómo las sociedades se organizan de acuerdo a las condiciones culturales, económicas o sociopolíticas, entre otras,

[1] Bonnard, Christophe and Jordi Corominas. "Landslide Hazard Management Practices in the World." *Landslides 2,* no. 4 (2005): 245-246.
[2] Crozier, Michel J. y Glade, Thomas, "Landslide Hazard and Risk: Issues, Concepts and Approach" T. Glade, M. Anderson and M.J. Crozier (Editors) en *Landslide hazard and risk*. (John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, England, 2005) 1-40.
[3] Bonnard, Christophe and Jordi Corominas. 2005. *Ibid.*

condicionando la respuesta esperada a las amenazas causadas por los deslizamientos.

A nivel internacional las evidencias muestran que los eventos por deslizamientos han aumentado de manera alarmante [4],[5]; y se espera que esta tendencia continúe por las siguientes razones:[6], [7]

1. incremento de la urbanización y desarrollos habitacionales en áreas propensas a deslizamientos,

2. aumento en la deforestación y las malas prácticas de manejo agrícola en áreas propicias a deslizamientos e,

3. incremento de la precipitación regional causada por cambios en los patrones climáticos.

Durante la Conferencia Mundial sobre Reducción de Desastres, celebrada en Kobe, Japón[8], uno de los elementos sobresalientes de la "Estrategia de Yokohama" fue la identificación de riesgos, evaluación, monitoreo y alerta temprana. Allí, los participantes propusieron el llamado "Marco de Acción de Hyogo 2005 - 2015", con tres objetivos estratégicos y cinco acciones prioritarias; éstas últimas se describen así:

a) Desarrollar, actualizar y difundir periódicamente mapas de riesgo, en un formato apropiado, con tomadores de decisiones, comunidades en riesgo y público en general.

[4] Schuster, Robert L., Nieto, Alberto S., O'Rourke, Thomas D., Crespo, Esteban, Plaza Nieto, Galo. "Mass wasting triggered by the 5 March 1987 Ecuador earthquakes" *Engineering Geology 42* (1996) 1-23.
[5] Dai, F. C., Lee, C. F., Ngai, Y. Y. "Landslide risk assessment and management: an overview" *Engineering Geology 64* (2002) 65-87.
[6] Schuster, Robert L., Nieto, Alberto S., O'Rourke, Thomas D., Crespo, Esteban, Plaza Nieto, Galo. *Ibíd.* 1996.
[7] Aleotti, P. and R. Chowdhury. "Landslide Hazard Assessment: Summary Review and New Perspectives." *Bulletin of Engineering Geology and the Environment 58*, (1999): 21-44.
[8] Naciones Unidas, "Hyogo Framework for Action 2005-2015: Building the Resilience of Nations and Communities to Disasters". (Kobe, Hyogo, Japan 2005).

b) desarrollar sistemas de indicadores de vulnerabilidad y riesgos a escalas nacionales y subnacionales, que permitan a los tomadores de decisiones evaluar los impactos sociales, económicos y ambientales.
c) difundir los resultados al público.
d) registrar, analizar, sintetizar y difundir, de manera regular, información estadística sobre la ocurrencia de desastres, a través de mecanismos internacionales, regionales, nacionales y locales.

Resulta alentador que, a pesar de las diferentes visiones sobre la gestión de los riesgos por deslizamientos, existe consenso en la comunidad sobre la zonificación cartográfica de los inventarios de eventos y los peligros, y sobre la utilización de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la producción y análisis de cartografía de riesgos. De tal modo, los redactores cartográficos reconocen que las zonificaciones de riesgos basadas en los SIG mantienen los tres principios básicos señalados por Varnes en 1984[9]:

1. El pasado y el presente son la clave para entender el futuro.
2. Las principales condiciones que causan los deslizamientos pueden ser estimadas.
3. El grado de peligro por deslizamiento puede ser estimado.

A éstos, en la actualidad se añade un cuarto principio[10]:

4. El riesgo total provocado por los deslizamientos también puede ser evaluado y cuantificado.

[9] Varnes, D. J. *Landslide Hazard Zonation: A Review of Principles and Practice*. UNESCO, 1984.
[10] Chacón, J., C. Irigaray, T. Fernández and R. El Hamdouni. "Engineering Geology Maps: Landslides and Geographical Information Systems." *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 65, no. 4 (2006): 341-411.

Los principales productos cartográficos utilizados para la gestión de riesgos son los *mapas de inventarios de deslizamientos*; la *cartografía de susceptibilidad por deslizamientos*; los *mapas de peligros* y la *cartografía de riesgos por deslizamientos*.

Los *mapas de inventarios* son un conjunto de datos espaciales que representan eventos múltiples o simples en el terreno provocados por movimientos gravitacionales. A gran escala, la cartografía de inventarios distingue entre los lugares de deposición de los materiales y las fuentes de origen de los mismos; los diferentes tipos de deslizamientos de acuerdo al material constitutivo; la distancia recorrida por los materiales y el volumen del material, entre otros; mientras que a pequeñas escalas, los mapas sólo contienen la localización espacial.

La *cartografía de susceptibilidad* trata sobre la distribución espacial de los factores asociados con los procesos de inestabilidad de laderas, con el objetivo de determinar aquellas áreas más propensas a contener estos fenómenos, sin considerar el tiempo transcurrido. La expresión cartográfica de la susceptibilidad se expresa mediante categorías (cuantitativas y/o cualitativas) de la estabilidad relativa que posee el territorio, producto de la combinación de los factores que provocan los deslizamientos. Es por esta razón que a la susceptibilidad se la considera como una expresión del riesgo relativo[11], o como la posibilidad/probabilidad total de ocurrencia de deslizamientos[12].

Los *mapas de peligros* los definió Varnes[13] como la probabilidad, en un período de tiempo determinado, de ocurrencia de un evento potencialmente perjudicial en un área determinada. La *cartografía de riesgos* presenta el costo anual esperado de los daños provocados por los deslizamientos mediante la combinación de la probabilidad espacial y temporal del fenómeno obtenido en los mapas de peligro y

[11] Einstein, H. H. "Special Lecture: Landslide Risk Assessment Procedure." In *Proceedings of the Vth ISL Lausanne*, 1075 - 1090. 1988.
[12] Chacón, J., C. Irigaray, T. Fernández and R. El Hamdouni. *Ibid.* 2006.
[13] Varnes, D. J. *Ibid.* 1984.

el análisis de las probables consecuencias de los daños a las personas, las propiedades, la infraestructura y el medio ambiente.

La zonificación del territorio mediante la identificación de las amenazas y la calificación del riesgo es una medida ampliamente utilizada por diferentes instituciones nacionales e internacionales por su viabilidad, a escala regional y factibilidad económica de realización[14]. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas[15] hay dos grupos de medidas para la reducción del riesgo: las medidas estructurales, que comprenden las acciones de intervención física; y las no estructurales, aquellas vinculadas a las políticas públicas (legislaciones, planes de emergencia, etc.). Como medida estructural, la cartografía de peligros, amenazas y riesgos representa una poderosa herramienta de mitigación, porque supone la ordenación y gestión del territorio, además de constituir un auxiliar en el desarrollo de los planes de emergencia.

El proceso de construcción cartográfica de los deslizamientos es complejo en esencia y, ciertamente, subjetivo. De acuerdo con van Westen y colaboradores[16], los procedimientos cuantitativos han demostrado su utilidad durante la etapa del análisis del peligro de los deslizamientos, mientras que parecieran estar en una fase incipiente en las etapas de análisis y evaluación del riesgo. En realidad, son pocos los autores que han desarrollado modelos, como Zêzere *et al.*[17], Guzzetti *et al.*[18] y Hong y colaboradores[19]. La mayoría de las propuestas como modelos de peligros

[14] Fell, Robin; Corominas, Jordi; Bonnard, Christophe; Cascini, Leonardo; Leroi, Eric & Savage, William Z. "Guidelines for Landslide Susceptibility, Hazard and Risk Zoning for Land Use Planning." *Engineering Geology 102* (2008): 85-98.
[15] Naciones Unidas, "Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres. La gestión del riesgo de desastres hoy: Contextos globales, herramientas locales". 2008
[16] van Westen, C. J., van Asch, T. W. J., & Soeters, R. "Landslide hazard and risk zonation—why is it still so difficult?" *Bulletin of Engineering Geology and the Environment 6* (2006): 167–184.
[17] Zêzere, J.L., Reis, E., Garcia, R., Oliveira, S., Rodrigues, M.L., Vieira, G., Ferreira, A.B. "Integration of spatial and temporal data for the definition of different landslide hazard scenarios in the area north of Lisbon (Portugal)". *Natural Hazards and Earth System Sciences 4* (2004): 133- 146.
[18] Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M., Ardizzone, F., "Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale". *Geomorphology 72* (2005): 272-299.
[19] Hong, Y., Adler, R.F., Huffman, G. "An Experimental Global Prediction System for Rainfall-Triggered Landslides Using Satellite Remote Sensing and Geospatial Datasets". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 45*, (2007): 1671-1680.

por deslizamiento en realidad son modelos de susceptibilidad que sólo proporcionan la estimación para los lugares, en los cuales se espera que ocurran los deslizamientos[20].

Independientemente de los procedimientos cualitativos y cuantitativos, un gran número de estudios sobre susceptibilidad parten de un diseño conceptual simple[21], dando por hecho el supuesto teórico de que la susceptibilidad de un área está relacionada con factores causales y, por tanto, puede ser evaluada, siempre y cuando se conozcan las relaciones que se establecen entre los factores y la ocurrencia espacial de los deslizamientos. Los factores causales son aquellos que actúan como catalizadores de otros componentes dinámicos y se dividen en dos grupos[22]: a) *los factores causales preparatorios* que provocan la susceptibilidad de la ladera al movimiento, pero sin iniciarlo; y b) los factores causales de activación que inician el movimiento.

Dentro de los primeros, se encuentran la litología, el gradiente de inclinación de las laderas, las propiedades físicas de los minerales y rocas, el patrón de drenaje y la profundidad de las aguas subterráneas; mientras que los segundos comprenden las lluvias intensas, los movimientos sísmicos, los períodos de sequía y humedad, los cortes en las laderas, entre otros.

Los factores causales preparatorios se han integrado mediante una función estadística multivariante para representar la relación entre éstos y los deslizamientos ocurridos en el pasado. Lo anterior forma parte de lo que se conoce como *evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos*. Se define como una evaluación cuantitativa o cualitativa de la clasificación del volumen (o área) y la distribución espacial de los

[20] Guzzetti, F. "Landslide Hazard and Risk Assessment" (Tesis doctoral, University of Bonn, Bonn, Germany, 2005) 399.
[21] Zhu, A. Xing, Rongxun Wang, Jianping Qiao, Cheng-Zhi Qin, Yongbo Chen, Jing Liu, Fei Du, Yang Lin and Tongxin Zhu. "An Expert Knowledge-Based Approach to Landslide Susceptibility Mapping Using Gis and Fuzzy Logic." *Geomorphology* 214, (2014): 128-138.
[22] WP/WLI: International Union of Geological Sciences Working Group on Landslides, Commission on Landslide Remediation (Chairman: M. E. Popescu), "A suggested method for reporting landslide remedial measures" *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, *60* (2001): 69-74

deslizamientos que existen en un territorio, o pueden ocurrir potencialmente[23]. Los Sistemas de Información Geográfica son una de las herramientas más utilizadas para esta etapa de análisis, porque la selección adecuada de los factores causales garantiza un buen resultado en la zonificación cartográfica.

Más aún, en los últimos años, las técnicas para la extracción de patrones y descubrimiento de conocimientos, conocidas como Minería de datos, son ampliamente utilizadas para la captura y representación matemática de las relaciones entre la susceptibilidad a los deslizamientos y los factores causales preparatorios. También, desempeñan un papel fundamental en el análisis de la calidad de los datos, la estimación de los errores y la precisión de los resultados. La Minería de datos se puede definir como un proceso que utiliza una amplia variedad de herramientas durante el análisis de la información para descubrir patrones y relaciones en los datos útiles y, posteriormente, realizar predicciones estadísticamente válidas.

Los modelos de predicción utilizan dos tipos principales de métodos: los *métodos estadísticos paramétricos globales*, y los *métodos estadísticos no paramétricos locales.* Los primeros, emplean variables predictivas como "la totalidad" para explicar la contribución de las mismas a la predicción probabilística. Una de las ventajas de estos métodos, como la Regresión Logística Múltiple (*Logistic Multiple Regression, LMR*), es que son fáciles y rápidas de calcular y su aplicación dentro de los SIG es sencilla. Su principal desventaja es que las funciones de respuestas son unimodales y simétricas y, frecuentemente, no resultan compatibles entre ellas.[24]

[23] AGS. *Guideline for Landslide Susceptibility, Hazard and Risk Zoning for Land Use Management*. Australian Geomechanics Society, Australian Geomechanics 1: (2007), 42

[24] Yee, T. W. and Mitchell, N. D. "Generalized additive models in plant ecology". *Journal of Vegetation Science* 2, (1991): 587-602.

Los modelos locales funcionan bajo la hipótesis de que la estrategia de selección y reducción de variables locales es lo suficientemente flexible para permitir las relaciones no lineales entre predictoras.[25]

En la presente tesis se combinaron procedimientos de álgebra espacial con el software ArcGIS 10.3 Desktop (http://www.esri.com); algoritmos de minería de datos como CART (*Classification and Regression Trees*), MARS (*Multivariate Adaptive Regression Splines*), Random Forests, TreeNet y Logit (Regresión Logística Múltiple) con la suite de minería de datos SPM v 8.0 (*Salford Predictive Modeler*) de http://www.salford-systems.com, y la metodología para predecir espacialmente las probabilidades por deslizamiento en el Sistema Hidroeléctrico Necaxa, Puebla, México.

I.1 Actualidad científica del tema y motivación.

En los próximos 15 años, aproximadamente el 70% de los recursos materiales y humanos de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), se destinarán a la vigilancia, evaluación, monitoreo y mitigación de riesgos por deslizamientos o inestabilidad de laderas en los ríos y embalses que abastecen a las centrales hidroeléctricas, operados por dicha institución.[26]

En tal sentido, esta tesis pretende cubrir la necesidad de estudiar y validar las relaciones espaciales que se establecen entre los agentes causales preparatorios y los agentes disparadores de deslizamientos, en un modelo teórico cuantitativo, que pueda replicarse en condiciones ambientales similares.

[25] Muñoz, Jesús and Ángel M. Felicísimo. "Comparison of Statistical Methods Commonly Used in Predictive Modelling." *Journal of Vegetation Science* 15, (2004): 285-292.
[26] Ing. Mena, Enrique, "Comunicación personal", Subgerente de Seguridad Estructural, Comisión Federal de Electricidad, [febrero de 2012].

La disponibilidad actual de herramientas tecnológicas para procesar y analizar cantidades masivas de datos permite cubrir el enunciado anterior, mediante lo que David Hand, denomina *análisis inteligente de datos*, como un proceso válido, novedoso y potencialmente útil de identificación de patrones comprensibles en los datos, sinónimos que se utilizan hoy en día para el proceso de Descubrimiento de Conocimiento en Bases de Datos (*Knowledge Discovery in Databases*, *KDD*), y también en los modelados de Minería de Datos.

I.2. Hipótesis.

La hipótesis principal de trabajo es que la aplicación de Sistemas de Información Geográfica y algoritmos de minería de datos, donde se relacionan el inventario de eventos gravitacionales y los factores causales preparatorios con el levantamiento geomorfológico a escala regional, permiten cuantificar y validar la reproducción de patrones en los datos espaciales.

I.3. Objetivos

El objetivo principal de la tesis es validar nuevos elementos metodológicos para mejorar el conocimiento sobre los procesos de riesgos geomorfológicos por deslizamientos en el área que ocupa el Sistema Hidroeléctrico Necaxa, como base para la predicción efectiva de deslizamientos a futuro.

I.4. Objetivos específicos.

- Identificar los efectos y las relaciones más significativas que se establecen entre las variables causales preparatorias, así como la importancia relativa de las mismas.

- Desarrollar procedimientos de evaluación de los peligros e impactos, basados en mapas de susceptibilidad, útiles para mejorar la calificación de las predicciones de amenazas por deslizamientos.

- Desarrollar una metodología cuantitativa mediante técnicas de análisis multivariante para la elaboración de cartografía de susceptibilidad, considerando la distribución espacial de los deslizamientos y las relaciones entre los factores causales preparatorios y las unidades de análisis territoriales.

- Establecer procedimientos de validación, independientes de la cartografía de susceptibilidad, con el fin de determinar los niveles de fiabilidad, confianza estadística y capacidad predictiva de los modelos.

- Contribuir al conocimiento de los procesos geomorfológicos, en general, y la evolución espacial de los mismos en el área de estudio, bajo las condiciones particulares de la influencia antrópica.

I.5. Preguntas de la investigación.

La pregunta principal que guía la tesis es: ¿Cómo diseñar e implantar una metodología para la evaluación y predicción de la susceptibilidad por deslizamientos en un sistema hidroeléctrico, tomando en cuenta los datos disponibles y la configuración territorial de los elementos expuestos?

De acuerdo al marco de referencia utilizado, esta pregunta ha derivado en las siguientes preguntas particulares:

- ¿Cuáles son las fuentes de información y los datos más adecuados para elaborar un inventario en las condiciones geográficas de la cuenca?

- ¿Cuáles son las variables litológicas, geotécnicas, geomorfológicas y antrópicas del área de estudio, más susceptibles a deslizamientos?

- ¿Cuál es el nivel de precisión y confiabilidad de la cartografía obtenida en el inventario de deslizamientos?

- ¿Qué tipo de datos disponibles, espaciales y no espaciales, son necesarios para realizar una evaluación del peligro por deslizamiento en un sistema hidroeléctrico?

- ¿Qué métodos y herramientas de análisis espacial podrían aplicarse al procesamiento de los datos y la producción de indicadores complejos de peligros?

- ¿Qué procedimientos de la estadística espacial podrían aplicarse para medir la confiabilidad de los indicadores?

- ¿Cuáles son los métodos de análisis espacial más apropiados para evaluar el peligro, de acuerdo a la escala de análisis y a la disponibilidad de datos en el área?

- ¿Cuál es el procedimiento estadístico multivariado más apropiado dentro de la evaluación cuantitativa de peligros para la construcción de escenarios de susceptibilidad en el sistema hidroeléctrico?

- ¿Cómo se manifiesta la distribución espacial de los escenarios de peligro por deslizamiento en el área de estudio?

I.6. Estructura del trabajo

La presente memoria de tesis está dividida en cinco capítulos. El primero aborda el marco teórico del estudio, prestando especial atención al estado que guardan las diferentes metodologías cuantitativas para el análisis de la susceptibilidad por deslizamientos y los procedimientos para el análisis y reconocimiento de patrones. El segundo capítulo abarca una descripción de las condiciones físico-geográficas del territorio bajo estudio y del Sistema Hidroeléctrico Necaxa. El capítulo tres expone la metodología, detallando las etapas para construir los diferentes modelos de peligros geomorfológicos, así como las estrategias empleadas para la construcción de la base de datos geográfica y la cartografía de los factores causales preparatorios. El cuarto capítulo contiene los resultados obtenidos bajos los diferentes criterios de probabilidad, dispuestos abordar para su posterior discusión

Finalmente, el quinto capítulo contiene las conclusiones y recomendaciones surgidas durante la investigación, así como la bibliografía consultada y los anexos complementarios.

II. Marco teórico del análisis de susceptibilidad y riesgos.

II.1 Antecedentes.

Entre 1900 y 2013, de acuerdo con la base de datos EM-DAT,[27] en el mundo perdieron la vida 59,912 personas, producto de deslizamientos, caídas de rocas, avalanchas, flujos de suelos y detritos. Según esta publicación, el costo estimado por dichas pérdidas fue de 8'449,998 millones de dólares. Aproximadamente el 90% de estas muertes ocurrieron en la Región Circumpacífica,[28], [29] y el 95% de éstas, se concentró en los países del Tercer Mundo.[30]

En México, las pérdidas de vidas humanas y materiales por estos fenómenos también resultan preocupantes. Tan sólo el 5 de octubre de 1999 murieron más de 200 personas por un deslizamiento en la colonia La Aurora, en Teziutlán, Puebla; y el 4 de julio de 2007, un deslizamiento en la localidad de Zacacoapa, municipio de Eloxochitlán, de la misma entidad, provocó 32 decesos. El 16 de septiembre de 2013, después de tres días de intensas lluvias ocasionadas por el huracán "Manuel", ocurrió un deslizamiento en la localidad La Pintada, Guerrero, cuyo balance inicial fue de 68 desaparecidos. Recientemente, en los primeros días del mes de agosto del año 2016, la tormenta tropical Earl ocasionó numerosos deslizamientos en el territorio de estudio, dejando un saldo de varias decenas de muertos y desaparecidos.

[27] "EM-DAT. The International Disaster Database", Centre for Research on the Epidemiology of Disasters –CRED. http://www.emdat.be/database. [consultado 8 abril 2013.]
[28] Aleotti, P; Chowdhury, R. "Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives" *Bulletin of Engineering Geology and the Environment 58* (1999): 21-44.
[29] Gokceoglu, Candan; Sezer, Ebru. "A statistical assessment on international landslide literature (1945–2008)" *Landslides 6* (2009): 345-351.
[30] Alcántara-Ayala, Irasema. "Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries" *Geomorphology* 47 (2002): 107-124.

Figura 1. Deslizamiento en el poblado de Huauchinango, Puebla, agosto de 2016. Fotografía de Dulce María del Carmen Benítez Martínez, 16 de septiembre de 2016.

En nuestro país, las autoridades y los investigadores han dedicado grandes esfuerzos al desarrollo de procedimientos para la evaluación de los riesgos por deslizamientos, mediante metodologías de carácter cualitativo. Sin embargo, poco se ha avanzado en el desarrollo de metodologías cuantitativas para la evaluación del peligro y la vulnerabilidad. Son escasos los trabajos que incorporan la validación de evidencias de ambos tipos (cualitativas y cuantitativas) y, aunque los investigadores asumen que los resultados obtenidos son adecuadamente razonables, no hay criterios para compararlos a nivel regional o internacional que determinen la fiabilidad de las predicciones incorporadas.

Figura 2. Tareas de Rescate de Víctimas En La Carretera De Zacacoapa, Puebla, Julio Del 2007. Fotografía José Castañares [31].

Se piensa que cuando ocurre un deslizamiento todos los elementos expuestos a la trayectoria del evento se destruyen, lo cual conduce a una falacia pues, si en un gráfico bidimensional el valor cero es la ausencia de daño, y la unidad es el daño total de cualquier elemento expuesto al riesgo (vidas humanas, edificaciones, etc.), tendríamos que todos los factores que caracterizan la amenaza o el peligro por deslizamiento son de magnitudes constantes. Por supuesto, el peligro no posee un valor constante. Sin embargo, si quisiéramos cuantificar este valor, dependería de muchos más factores que la simple exposición; lo que determinaría la necesidad de estudiar la magnitud e intensidad de los daños físicos sobre los distintos elementos que la conforman, teniendo en cuenta los aspectos regionales y locales.

[31] Mota Corro, Josué. "El año pasado el Cupreder advirtió sobre peligros en deslaves", jueves 5 de julio de 2107 La Jornada de Oriente, Puebla. http://www.lajornadadeoriente.com.mx/2007/07/05/puebla/pue402.php. [consultado 8 abril 2013.]

Figura 3. Imagen satelital Spot 5 del 7 de diciembre de 2011 (a), localidad La Pintada, municipio Atoyac de Álvarez, Guerrero. En la secuencia b se observa el deslizamiento que produjeron las lluvias del ciclón "Manuel".[32]

La inestabilidad de laderas en las cuencas colectoras de los embalses -aguas arriba o aguas abajo-, son fenómenos más frecuentes que lo deseado para constructores y operadores de presas y centrales hidroeléctricas. La Comisión Internacional de Grandes Presas [33] ha reportado en más del 75 % de sus grandes presas, a nivel mundial –cerca de 27,000-, la ocurrencia de deslizamientos o la existencia de factores detonantes para que éstos sucedan. Es decir que, además de considerarse como un fenómeno de origen natural, los que ocurren en el área de los reservorios de presas poseen propiedades singulares, distinguiéndose de otros tipos de deslizamientos[34], porque:

- Las laderas en los reservorios están sujetas a cambios constantes de humedad, a causa de las variaciones que sufre el nivel del agua que inducen las políticas de operación.

[32] Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). *Monitoreo satelital*. 2016
[33] ICOLD, *Reservoir landslides: Investigation and management. Guidelines and case histories*. International Commission on Large Dams. (Paris, France, 2002)
[34] ICOLD, 2002, *Ibidem.*

• Las modificaciones en el nivel del embalse provocan ascensos o descensos en el nivel de las aguas subterráneas, que alteran las propiedades físicas y mecánicas de los materiales constituyentes de las laderas.

• En los embalses se incrementan las probabilidades de ruptura cuando los deslizamientos provocan:

- bloqueo total o parcial de las obras de salida (vertedores y canales).
- daño por olas de impulso, generadas por caídas rápidas de grandes volúmenes de material.
- impacto directo en la cortina o en obras auxiliares.

• En eventos de gran velocidad, las olas generadas por el deslizamiento propician efectos adversos, que se extienden aguas arriba y aguas abajo del embalse.

El análisis histórico de 145 casos de deslizamientos en embalses artificiales realizado por Riemer[35], ofrece una larga lista de potenciales problemas para los operadores de presas y los habitantes en las cercanías de las mismas. Ésta incluye: la reactivación de deslizamientos antiguos; el incremento súbito del nivel de aguas abajo por la incapacidad de controlar el desfogue del embalse; los deslizamientos aguas abajo por filtraciones o roturas en la cortina de la presa; los deslizamientos en cuencas adyacentes o interconectadas; la erosión de la línea litoral del embalse; la erosión y la avulsión aguas abajo, en los cauces de los ríos; los deslizamientos en varios embalses conectados por una red fluvial; la erosión interna de materiales finos; la subsidencia y el colapso de materiales propicios en áreas extensas; el colapso en territorios kársticos; la flotación de cenizas y materiales pumíticos en el embalse; la ruptura acelerada de frente de glaciares; los efectos termales en

[35] Riemer, W., "Landslides and reservoirs. Keynote Papers". 1992, En: *Proceedings 6th International Symposium on Landslides*, Christchurch, pp 1973 – 2004.

regiones con permafrost; la disolución de evaporitas y la desestabilización de las arcillas por intercambio iónico.

De acuerdo al mismo autor, las consecuencias comprobadas de esta lista de problemas son: inundaciones aguas abajo; pérdidas humanas, económicas, ecológicas e históricas en las comunidades aguas abajo del embalse, causadas por la rotura de la cortina; impactos directos en las obras y estructuras auxiliares; daños por las olas del reservorio en las comunidades e infraestructura de la línea litoral; pérdidas económicas y financieras por fallas operacionales; pérdida de la capacidad de almacenamiento del embalse; abandono y pérdida de la infraestructura; pérdida de valores turísticos recreacionales del embalse y reducción en la calidad del agua[36].

Además de los procesos de remoción de masa en las laderas de los embalses artificiales, los deslizamientos provocan bloqueos en los cauces de los ríos, que al romperse el dique o cortina que retiene el agua almacenada, causan inundaciones catastróficas. Schuster y Costa[37] reportaron que, en 73 casos de fallas de presas documentadas, el 27% ocurrieron a menos de un día de la formación de la presa, y 50% fallaron en menos de 10 días; siendo las inundaciones los eventos más sobresalientes.

Existe una amplia literatura internacional sobre las causas y consecuencias de deslizamientos en presas[38]. Algunos ejemplos de las diversas metodologías empleadas son los trabajos de Costa y Schuster[39],[40] con el inventario de 463 eventos alrededor del mundo. Uno de los casos más espectaculares por su efecto devastador, es el deslizamiento en la presa Vaiont, sobre el río Piave, al norte de Italia, el 9 de

[36] Riemer, W., 1992*, Ibidem.*
[37] Schuster, Robert L. and John E. Costa. "A Perspective on Landslide Dams." In *Landslide Dams: Process, Risk and Mitigation*, edited by Robert L. Schuster, 1-20: ASCE Geotechnical Special Publication, 1986.
[38] Schuster, Robert L. "Risk-Reduction Measures for Landslide Dams." *Italian Journal of Engineering Geology and Environment* 1, (2006): 9-13.
[39] Costa, John E., Schuster, Robert L.,"The formation and failure of natural dams". *Geological Society American Bulletin* 100, (1988): 1054-1068
[40] Costa, John E. and Robert L. Schuster. *Documented Historical Landslide Dams from around the World* Vancouver, WA: U.S. Geological Survey, 1991.

octubre de 1963. En esta presa ocurrió un desplazamiento de más de 270 millones de metros cúbicos de material a alta velocidad (superior a 30 m/s), que generó una ola de impulso de 100 m de altura, desbordando la cortina[41].

En China, Dai *et al.*[42], documentaron con evidencias geomorfológicas e históricas, un deslizamiento provocado por el terremoto Kangding-Luding, de magnitud *M=7.7*, el 1 de junio de 1786, que formó una ola de impulso de 70 m de altura sobre el río Dadu, Sichuan. Durante 10 días el material removido por el deslizamiento embalsó 1,400 km^2, causando la muerte a más de 100,000 habitantes. El deslizamiento Tangyanguang, en la presa Zaxi, China, en 1961, creó una ola de 21 m de altura que recorrió una distancia de 15 km aguas abajo, a una velocidad de 20 m/s. El deslizamiento Xintan en el río Yangtze, en 1985, originó una ola de 49 m de altura, opuesta al deslizamiento que recorrió 20 km aguas arriba y aguas abajo, hasta desaparecer. En la presa Xiangxi, 5 km aguas abajo, la altura de la ola alcanzó los 7 m de altura[43].

En la provincia de Sichuan, sureste de China, el 10 de junio de 2008, el terremoto Wechuan de M=7.9, originó el deslizamiento de la presa Tangjiashan, con un volumen de 20.4 millones de m^3 y una ola de impulso entre 82–124 m de altura. Sólo dos días después, el 12 de junio, se produjo el deslizamiento Xiaogangjian, con una ola cuya altura máxima alcanzó 70 m sobre el río Mianyuanhe, y un volumen estimado de 2 millones de m^3 de material.

El 21 de septiembre de 1999, el terremoto Chi – Chi, de magnitud M=7.3, en Taiwán, disparó un deslizamiento aproximadamente de 125 millones de m^3 de materiales rocosos, mismos que represaron un volumen estimado de 46 millones de m^3 del río Chingshui.

---

[41] Semenza, E., Ghirtotti, F. D. "History of the 1963, Vaiont Slide: the importance of geological factors*". Bulletin of Engineering Geology and Environment* 59, (2000): 87-97

[42] Dai, F. C., Lee, C. F., Deng, J. H., Tham, L. G. "The 1786 earthquake-triggered landslide dam and subsequent dam-break flood on the Dadu River, southwestern China". *Geomorphology* 65, (2005): 205 -221.

[43] Dai, F. C, et. al, 2005. *Ibidem*.

En tierras sudamericanas, en 1983, un sismo generó el deslizamiento, aguas arriba, de La Josefina, bloqueando el embalse Paute, en Ecuador. El deslizamiento Tablachaca No. 5, en la presa del mismo nombre, en el río Mantaro, Andes Centrales, Perú, ocurrido en septiembre de 1972, generó un incremento inmediato de 72 m de altura del nivel del embalse. Hasta 1979, el deslizamiento continuaba activo con movimientos de 0.5 m/día.

En México, los reportes más antiguos de fallas por deslizamientos ocurridos en presas refieren el año 1953: el dique Pescaditos, de la Presa Miguel Alemán, (Oaxaca) se deslizó aguas abajo. En 1970, en la presa El Estribón, (Jalisco) otro dique de tierra y enrocamiento falló de la misma manera. Ese mismo año, el dique La Laguna, perteneciente al Sistema Hidroeléctrico Necaxa (SHN), tuvo un colapso de 30 m de ancho en la margen izquierda, liberando 20 millones de m^3 de agua y provocando deslizamientos masivos de laderas, con la consiguiente pérdida de caminos y cultivos. A nivel nacional, el evento más importante de represamiento natural ocurrió el 4 de noviembre de 2007, en San Juan Grijalva (Chiapas), entre la presa Peñitas y la presa Malpaso, donde se movilizaron entre 48 y 50 millones de m^3 de material, producto de precipitaciones intensas y un sismo de M=4.5 [44], [45], [46], [47], [48].

[44] Alcántara-Ayala, Irasema, Domínguez-Morales, Leobardo. [en línea], "The San Juan de Grijalva Catastrophic Landslide, Chiapas, Mexico: Lessons Learnt", 2008, en *Web Proceedings of The First World Landslide Forum: Tokio, Japón, United Nations University, ICL-International Consortium on Landslides/ISDR-United Nations International Strategy for Disaster Reductions*, 96-99. http://www.iclhq.org/WLFweb/parallel_sessions.pdf [Consulta: 10 junio 2013]

[45] Dávila Serrano, Moisés, Jiménez, Oscar, "A geologic study of the Juan del Grijalva landslide, the most important mass movement during the last century in Mexico", *Natural Hazards* 58, (2011): 183-197

[46] Hernández-Madrigal Víctor, Mora-Chaparro, Juan, Garduño-Monroy, Víctor, "Large block slide at San Juan Grijalva, Northwest Chiapas, Mexico". *Landslides* 8, (2011): 109-115

[47] Hinojosa-Corona, Alejandro, Rodríguez-Moreno, Víctor Manuel, Munguía-Orozco, Luis, Meillón-Menchaca, Octavio. "El deslizamiento de ladera de noviembre 2007 y generación de una presa natural en el río Grijalva, Chiapas, México", *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 63, no. 1, (2011): 15-38

[48] Marengo-Mogollón, Humberto, [en línea] "Deslizamiento de tierra y roca que obstruyó el río Grijalva". 2008. Comisión Federal de Electricidad, Colegio de Ingenieros Civiles de México, http://ingenet.com.mx/noticias/?p=2841, [Consulta: 10 junio 2013]

Figura 4a. San Juan antes del deslizamiento[49].

Figura 4b. San Juan Grijalva después del deslizamiento [50.]

[49] Marengo-Mogollón, Humberto, [en línea].2011, *Ibidem*.
[50] Marengo-Mogollón, Humberto, [en línea].2011, *Ibidem*.

Las fuertes lluvias en octubre de 1999, provocadas por la depresión tropical No. 11 y el frente frío No. 5, también afectaron las centrales hidroeléctricas en la Sierra Norte de Puebla. Deslizamientos traslacionales y complejos (figura 5) destruyeron las plantas de Tepexic y Patla, manteniéndolas fuera de servicio durante varios meses, y cuya reconstrucción costó decenas de millones de dólares.

Figura 5. Flujo deslizante de derrubios de basaltos y material de la formación Pimienta, octubre de 1999. A la izquierda, tubos de conducción de agua. Fotografía de archivo del Ing. José Arturo Montiel Rosado (†).

Figura 6. Central hidroeléctrica de Patla. En la esquina superior derecha, el tanque de aireación y ductos de conducción de agua a las turbinas. Se observa el contacto entre derrames basálticos y rocas calizas. Fotografía del autor, 2006.

Figura 7. Bloque de caliza (formación Pimienta), resultado del deslizamiento de 1999 y anclado. A la derecha, se observan las torres de alta tensión y parte de la Central hidroeléctrica de Patla y Río Necaxa (a partir de unos pocos kilómetros se denomina Río Tecolutla). Fotografía del autor, 2006.

Figura 8. Bloque de caliza (formación Pimienta), resultado del deslizamiento de 1999 y anclado. Fotografía del autor, 2006.

Figura 9. Detalle del bloque de caliza (formación Pimienta), resultado del deslizamiento de 1999, anclado y extensómetro en la parte superior. Fotografía del autor, 2006.

II.2. Aproximaciones metodológicas para la evaluación de la susceptibilidad por riesgos geomorfológicos.

La definición más aceptada del término *deslizamiento* es la propuesta por Cruden[51], como el movimiento de rocas, derrubios y suelos que ocurre en una ladera. A pesar de la sencillez de esta definición y la profusión de trabajos sobre el tema, es común encontrar en la literatura la confusión entre el proceso (movimiento de masa) y el resultado (depósito).

Cuando en la década de los 90's se inicia el Inventario Mundial de Deslizamientos (World Landslide Inventory, WLI), la comunidad científica internacional se vio obligada a normalizar los conceptos operativos. Esto produjo varias publicaciones del grupo de trabajo de la UNESCO sobre nomenclaturas de deslizamientos[52],[53]; sus causas[54]; las tasas de movimiento[55] y las medidas de mitigación y corrección de los mismos[56],[57]. En México, los trabajos de Alcántara-Ayala[58] marcaron pautas de estandarización para las definiciones.

Crozier[59] definió tres estados dinámicos a lo largo de una ladera teórica, basados en la capacidad de las fuerzas externas para producir una ruptura (figura 10). El

[51] Cruden, D. M. "A Simple Definition of a Landslide." *Bulletin of the International Association of Engineering Geology - Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur* 43, no. 1 (1991): 27-29.
[52] IAEG-Commission on Landslides. "Suggested nomenclature for landslides". 1990. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology - Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur* 41, (1990):13-16.
[53] UNESCO-WP/WLI. *Multilingual Landslide Glossary.* 1993. Bitech Publishers Ltd, Richmond, p 34.
[54] UNESCO-WP/WLI. "A suggested method for reporting landslide causes". *Bulletin of the International Association of Engineering Geology - Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur* 50, (1994): 71-74.
[55] IUGS-Working group on landslide. "A suggested method for describing the rate of movement of a landslide". *Bulletin of the International Association of Engineering Geology* 52, (1995): 75-78.
[56] IUGS-Working group on landslide. "A suggested method for reporting landslide remedial measures" *Bulletin of Engineering Geology and Environment* 60, (2001): 69-74.
[57] Popescu, M.E., "Landslide causal factors and landslide remedial options". *Keynote lecture Proceedings 3rd international conference on landslide, slope stability and safety of infrastructures*, Singapore, (2002): 61-81.
[58] Alcántara-Ayala, Irasema. "Landslides: ¿Deslizamientos o Movimientos del Terreno? Definición, Clasificaciones y Terminología." *Investigaciones Geográficas* 41, (2000): 8-25.
[59] Crozier, M. J. *Landslides: Causes, Consequences and Environment* (Routledge, London, 1989): 252.

primero, denominado estado estable, ocurre cuando el margen de estabilidad es lo suficientemente alto para oponerse a la acción de las fuerzas dinámicas naturales, en un régimen geomorfológico.

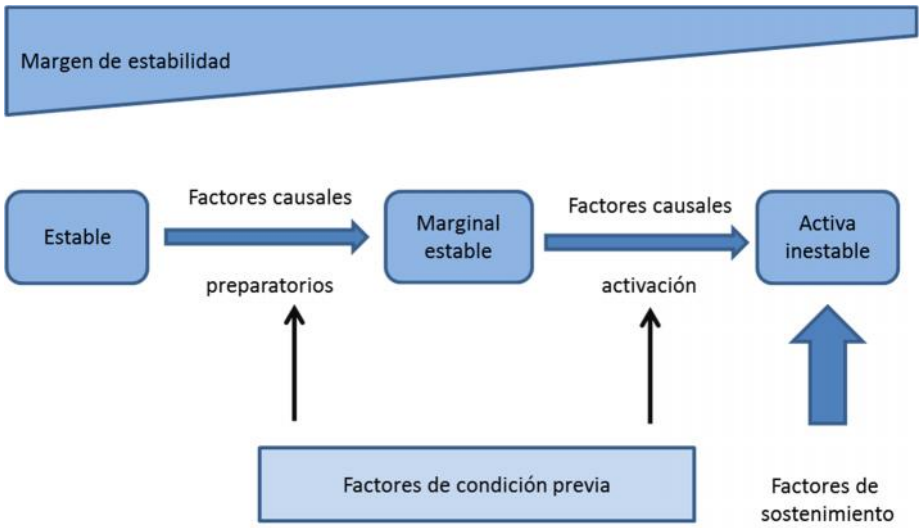

Figura 10. Factores causales de deslizamientos (de acuerdo a Glade y Crozier [60] y modificado por el autor)

El segundo, denominado marginalmente estable, está representado por laderas en equilibrio que puede ser alterado cuando las fuerzas dinámicas externas superan cierto umbral. Por último, se encuentran las laderas en estado activamente inestable, identificable cuando el margen de estabilidad es cercano a cero y sufren movimientos continuos e intermitentes.

Para Selby[61], los procesos geomorfológicos actúan sobre dos tipos de vertientes: el primero corresponde a laderas controladas por la erosión, donde las tasas de erosión son menores que el potencial de remoción del sedimento; el segundo se

[60] Crozier, Michel J. & Glade, Thomas, "Landslide Hazard and Risk: Issues, Concepts and Approach" T. Glade, M. Anderson and M.J. Crozier (Editors*) en Landslide hazard and ri*sk. (John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, England, 2005): 43 -74.
[61] Selby, M.J. Controls on the stability and inclinations of hillslopes formed on hard rock. *Earth Surface Processes and Landforms*, 7 (1982): 449-467.

refiere a laderas limitadas por el transporte, cuando éste no puede eliminar todo el sedimento que se encuentra en ellas.

Por su parte, los factores de condición previa, también conocidos como causales, son componentes que actúan como catalizadores de otros componentes dinámicos, mismos que se dividen en dos grupos[62]: 1) factores causales preparatorios, que provocan susceptibilidad de la ladera al movimiento sin iniciarlo, pero tienden a colocarla en una condición marginal-estable y, 2) factores causales de activación, que son los que inician el movimiento.

Los causales de activación o desencadenantes más comunes son las lluvias intensas, los períodos prolongados de humedad, los movimientos sísmicos o los cortes en las laderas, entre otros. Cuando aparece el estado marginal estable en una ladera, es posible reconocer el valor del umbral que inicia el movimiento o factor desencadenante (figura 11), conocido como umbral extrínseco[63].

[62] WP/WLI: International Union of Geological Sciences Working Group on Landslides, Commission on Landslide Remediation (Chairman: M. E. Popescu), "A suggested method for reporting landslide remedial measures" *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, *60* (2001): 69-74
[63] Crozier, M, Glade, T. *Ibidem*. 2005.

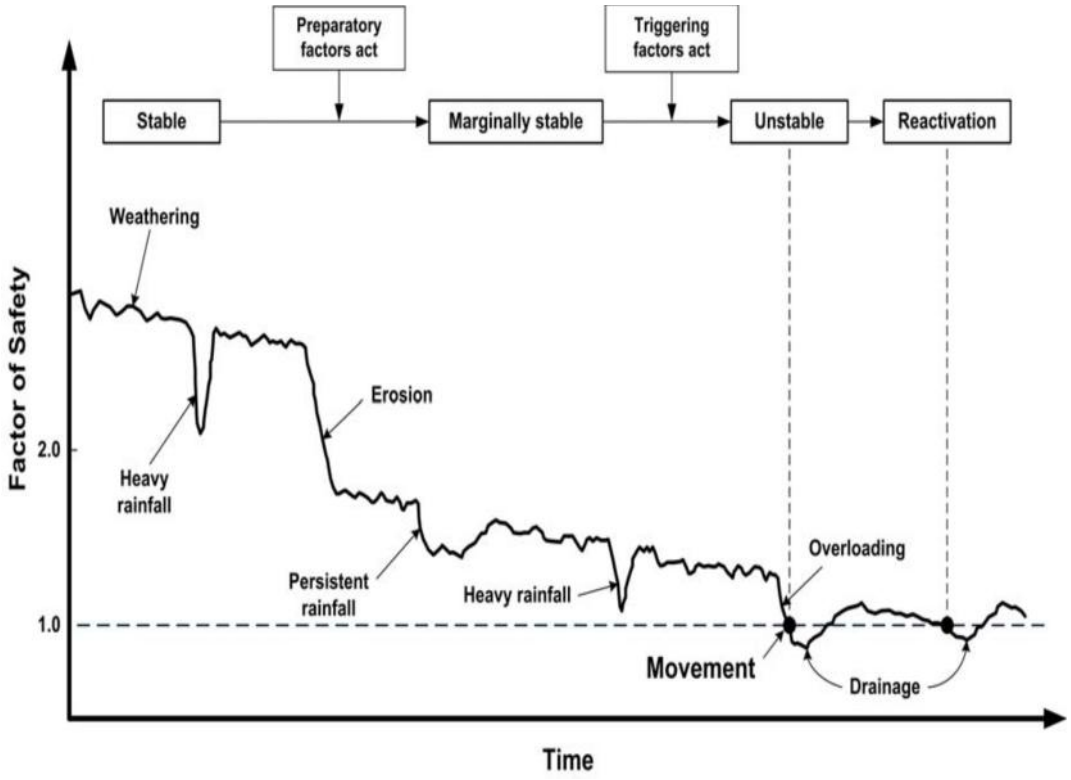

Figura 11. Activación del factor de seguridad (FS) en laderas de acuerdo al tiempo transcurrido.[64]

No siempre el umbral extrínseco es fácil de reconocer, como lo señalan los autores antes mencionados. Si, por el contrario, éste puede identificarse, se advierten dos oportunidades útiles para la estimación del riesgo: la primera ocurre cuando el umbral varía junto a la estabilidad inherente al terreno, permitiendo que las diferencias espaciales del valor de los umbrales de activación proporcionen una medida relativa de la distribución geográfica de la susceptibilidad, ante los deslizamientos.[65]

[64] Cruden, D. and D. F. VanDine. *Classification, Description, Causes and Indirect Effects - Canadian Technical Guidelines and Best Practices Related to Landslides: A National Initiative for Loss Reduction*. Geological Survey of Canada, 2013.
[65] Glade. T. "Establishing the frequency and magnitude of landslide-triggering rainstorm events in New Zeland". *Environmental Geology,35* (1998): 160-174.

La segunda oportunidad se presenta una vez identificado el umbral de activación, pues este valor determina la frecuencia de ocurrencia de los deslizamientos, generando condiciones de referencia.

Los factores causales preparatorios son componentes dinámicos que disminuyen el margen de estabilidad en una ladera, pero sin iniciar realmente el movimiento. Por definición, facilitan las condiciones previas para el cambio de estado estable a marginalmente estable, y operan en períodos más o menos largos de tiempos geomorfológicos[66].

El análisis de los umbrales no sólo se fundamenta en los valores de inicio o disparo de los deslizamientos (magnitud), o en la frecuencia de ocurrencia. También influye la disponibilidad y fuentes de material no consolidado en parteaguas y laderas. Este fenómeno, que Crozier y Preston denominaron "resistencia al evento", pudimos detectarlo en las cercanías de las Centrales Hidroeléctricas Patla y Central Hidroeléctrica Tepexi, durante los trabajos de campo del año 2009, cuando lluvias intensas, no provocaron deslizamientos, porque la resistencia residual del terreno se había fortalecido por medios antrópicos y existía muy poco material para activar flujos de escombros.

La naturaleza de los riesgos geomorfológicos por deslizamientos puede agruparse en "modelos de respuestas a procesos", físicamente basados en procesos de transporte y acumulación de sedimentos y ordenados en una estructura jerárquica temporal, donde los procesos más antiguos poseen un mayor grado de incertidumbre que los más recientes.

Dada la naturaleza espacial y temporal del problema, resulta difícil establecer certezas sobre la ocurrencia espacial de eventos de riesgos. De ahí, la conveniencia de calcular probabilidades de que ocurra un evento mediante el análisis de los

[66] Crozier, M, Glade, T. *Ibidem*. 2005.

factores causales preparatorios y los disparadores, incorporando modelos espaciales que describan los estados dinámicos del relieve.

Existe una gran variedad de enfoques y metodologías para evaluar los riesgos por deslizamientos. Esta diversidad afecta los resultados, generalmente cartográficos, propuestos a las autoridades que implantan las medidas de mitigación de riesgos. Diversas instituciones han formalizado directrices para la preparación de la cartografía de riesgos por deslizamientos como la OFAT, OFEE, OFEFP; GEO. Algunos trabajos del *Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes* (JTC-1) dirigidos por Fell, se han convertido en estándares oficiales de la industria: *Risk management: guidelines for decision-makers*, de la *Canadian Standards Association* y *Landslide risk management concepts and guidelines*, de la *Australian Geomechanics Society, Subcommittee on Landslide Risk Management*. Sin embargo, las metodologías implantadas divergen significativamente de país a país, e incluso aún dentro del mismo[67].

En contraste con otros tipos de procesos geomorfológicos como los fluviales, los eventos gravitacionales de riesgo son de caracteres excepcionales: discontinuos en el tiempo y en el espacio, y arbitrarios en magnitudes[68] (factores de activación de pequeña magnitud pueden provocar deslizamientos de consecuencias devastadoras), lo que demanda un análisis conjunto de datos discontinuos. Esto significa que los deslizamientos son eventos temporalmente dinámicos, espacialmente discretos, por lo cual los factores ambientales que los controlan pueden simularse de manera estocástica. A diferencia de otros fenómenos naturales como terremotos y huracanes que poseen parámetros espaciales continuos (aceleración del terreno, velocidad del viento, precipitación, etc.), los deslizamientos

[67] Corominas, J., C. van Westen, P. Frattini, L. Cascini, J. P. Malet, S. Fotopoulou, F. Catani, M. Van Den Eeckhaut, O. Mavrouli, F. Agliardi, K. Pitilakis, M. G. Winter, M. Pastor, S. Ferlisi, V. Tofani, J. Hervás and J. T. Smith. "Recommendations for the Quantitative Analysis of Landslide Risk." *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, (2013).
[68] Guthrie, R. H. and S. G. Evans. "Work, Persistence, and Formative Events: The Geomorphic Impact of Landslides." *Geomorphology* 88, no. 3-4 (2007): 266-275.

son procesos de movimientos de masa complejos controlados por varios factores geo-ambientales[69].

Hansen[70] divide el análisis de las laderas en dos enfoques:

a) Desde la visión ingenieril, el enfoque se orienta a la estabilidad de un punto concreto para satisfacer los requisitos de ejecución y operación de un proyecto determinado. La estabilidad de las propiedades físicas y químicas de los materiales constituyentes de las laderas, se estudia mediante análisis de laboratorio y trabajo de campo; se introducen en un modelo de estabilidad empírico y/o determinístico, y se calcula el factor de seguridad de la vertiente.

b) La perspectiva geomorfológica trata de determinar la variabilidad espacial de la estabilidad en áreas extensas. Aquí, el autor diferencia entre métodos directos e indirectos. Los primeros, son aquellos en los que la cartografía geomorfológica se realiza directamente evaluando el peligro, la susceptibilidad o el riesgo en el terreno, analizando las formas e identificando los lugares deslizados para extrapolar los criterios de evaluación al resto del área. Los métodos indirectos consisten en la combinación de diversos factores relacionados con la inestabilidad/estabilidad, considerando la ocurrencia de deslizamientos en relación con los factores que controlan la inestabilidad. Puede afirmarse que los directos son métodos cartográficos sintéticos, y los indirectos, métodos analíticos. En la práctica, tanto los métodos directos, indirectos, así como los de ingeniería geotécnica se traslapan y, en ocasiones, las metodologías resultan combinaciones de los tres grupos citados.

[69] Ayalew, Lulseged and Hiromitsu Yamagishi. "The Application of Gis-Based Logistic Regression for Landslide Susceptibility Mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan." *Geomorphology* 65, no. 1-2 (2005): 15-31.
[70] Hansen, A. "Landslide Hazard Analysis." In *Slope Instability*, edited by D. Brunsden and D.B Prior, 523-602. Chichester: Wiley, Interscience, 1984.

Dicha división puede observarse en las investigaciones realizadas por José Lugo-Hubp y colaboradores [71] al analizar los deslizamientos ocurridos en la Sierra Norte de Puebla por las lluvias de octubre de 1999; en la tesis de licenciatura de Pablo Flores [72] sobre los deslizamientos en Teziutlán y el posterior artículo con Alcántara-Ayala [73]; las tesis de licenciatura y maestría (2002 y 2008) de Zoila Hernández Mena[74], [75]; al igual que los trabajos de titulación de licenciatura y maestría de Borja Baeza[76 ,77], y las posteriores publicaciones con Alcántara-Ayala [78], [79].

En este tenor, también se encuentran los trabajos de Lucia Capra y colaboradores [80] , quienes analizan las características de los movimientos de masa en los depósitos volcánicos de Teziutlán, Puebla. Para el mismo año, 2003 [81], la autora publica un texto sobre deslizamientos en Zapotitlán de Méndez y su relación

[71] Lugo-Hubp, J., M.T. Vázquez-Conde, G. Melgarejo-Palafox, F. García-Jiménez and G. Matías-Ramírez. "Procesos gravitacionales en las montañas de Puebla." *Ciencia y desarrollo* 27, no. 157 (2001): 24-33.

[72] Flores-Lorenzo, Pablo. "Inestabilidad de las laderas y riesgos asociados en Teziutlán, Puebla: México." Universidad Nacional Autónoma de México, 2002.

[73] Flores-Lorenzo, Pablo and Irasema Alcántara-Ayala. "Cartografía morfogenética e identificación de procesos de ladera en Teziutlán, Puebla." *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, no. 49 (2002): 7-26.

[74] Hernández-Mena, Zoila. "Estudio geológico y geotécnico del deslizamiento Zapotitlán de Méndez ubicado en la Sierra Norte del estado de Puebla: México." Universidad Nacional Autónoma de México. 2002

[75] Zoila, Hernández Mena. "Mapa de susceptibilidad a procesos de remoción en masa con base en análisis multivariado: la región de Zapotitlán de Méndez, Puebla." Universidad Nacional Autónoma de México, 2008.

[76] Borja-Baeza, Roberto. "Análisis de susceptibilidad y riesgo asociado a procesos de remoción en masa en Zacapoaxtla, Puebla." Universidad Nacional Autónoma de México, 2003.

[77] Borja Baeza, Roberto Carlos. "Inestabilidad de laderas en Tlatlauquitepec, Sierra Norte de Puebla: análisis y modelación en materiales sedimentarios." Universidad Nacional Autónoma de México, 2006.

[78] Borja Baeza, Roberto Carlos and Irasema Alcántara-Ayala. "Procesos de remoción en masa y riesgos asociados en Zacapoaxtla, Puebla." *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, no. 53 (2004): 7-26.

[79] Borja Baeza, Roberto Carlos and Irasema Alcántara-Ayala. "Susceptibility to mass movement processes in the municipality of Tlatlauquitepec, sierra norte de Puebla." *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, no. 73 (2010): 7-21.

[80] Capra, L., J. Lugo-Hubp and L. Borselli. "Mass Movements in Tropical Volcanic Terrains: The Case of Teziutlán (México)." *Engineering Geology* 69, no. 3-4 (2003): 359-379.

[81] Capra, L., J. Lugo-Hubp and N. Dávila-Hernández. "Fenómenos de remoción en masa en el poblado de Zapotitlán de Méndez, Puebla: relación entre litología y tipo de movimiento. ." *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 20, no. 2 (2003): 95-106.

con la litología. Norma Dávila Hernández[82] emplea el análisis estadístico multivariado condicional para zonificar el peligro en Teziutlán, Puebla. José Marcos López[83] se titula con una tesis sobre la distribución espacial de los deslizamientos en el municipio de Tlatlauquitepec, Puebla.

En 2004, Alcántara Ayala[84] evalúa el riesgo que induce la lluvia en los movimientos gravitacionales de masa en México, apuntando sobre la Sierra Norte; mientras que V. Ochoa-Tejeda[85],[86],[87] muestra una metodología de estudio para laderas inestables utilizando la percepción remota en diferentes escalas. En 2006, Alcántara Ayala y colaboradores publican un estudio sobre la relación entre los procesos de deforestación por cambios en los usos del suelo en la Sierra Norte de Puebla y el incremento de los deslizamientos[88]. Lucia Capra[89] y colaboradores analizan el fenómeno de la relación entre las propiedades geotécnicas de los materiales y los procesos de remoción en el poblado de Totomoxtla, Puebla durante eventos intensos de lluvias. Por su parte, Lugo Hubp y colaboradores[90] elaboraron

[82] Dávila-Hernández, N. "Zonificación del peligro por procesos de remoción en masa con base en la aplicación de un análisis estadístico multivariado condicional: la barranca El Calvario, Teziutlán, Puebla: México." Universidad Nacional Autónoma de México, 2003.
[83] Marcos-López, J. "Distribución espacial de los procesos de remoción en masa y riesgos asociados en el municipio de Tlatlauquitepec, Puebla: México." Universidad Nacional Autónoma de México, 2003.
[84] Alcántara-Ayala, Irasema. "Hazard Assessment of Rainfall-Induced Landsliding in Mexico." *Geomorphology* 61, no. 1-2 (2004): 19-40.
[85] Ochoa-Tejeda, V. "Propuesta metodológica para el estudio de inestabilidad de laderas a partir de los MDT y la percepción remota: México." Universidad Nacional Autónoma de México, 2004.
[86] Ochoa-Tejeda, Verónica and Jean-François Parrot. "Extracción automática de trazas de deslizamientos utilizando un modelo digital de terreno e imágenes de satélite de alta resolución Ikonos. Ejemplo en la Sierra Norte de Puebla, México." *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 24, no. 3 (2007): 354-367.
[87] Ochoa-Tejeda, V. "Control estructural de la inestabilidad de laderas: modelación tridimensional de los rasgos geológicos: aplicación al estudio de los procesos de remoción en masa de la Soledad, Sierra Norte de Puebla, México " Universidad Nacional Autónoma de México, 2009.
[88] Alcántara-Ayala, Irasema, O. Esteban-Chávez and J. F. Parrot. "Landsliding Related to Land-Cover Change: A Diachronic Analysis of Hillslope Instability Distribution in the Sierra Norte, Puebla, Mexico." *Catena* 65, no. 2 (2006): 152-165.
[89] Capra, Lucia, José Lugo-Hubp and José Juan Zamorano-Orózco. "La importancia de la geología en el estudio de los procesos de remoción en masa: el caso de Totomoxtla, Sierra Norte de Puebla, México." *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* LVIII, no. 2 (2006): 205-214.
[90] Lugo-Hubp, J., J. Zamorano-Orozco, Lucia Capra, M. Inbar. and Irasema Alcántara-Ayala. "Los procesos de remoción en masa en la Sierra Norte de Puebla, octubre de 1999: causas y efectos." *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 22, no. 2 (2005): 212-228.

un estudio geomorfológico para identificar las principales unidades del relieve afectadas por los eventos de octubre de 1999, en la Sierra Norte de Puebla.

Los tratamientos para la modelación espacial de los deslizamientos se pueden dividir en cuatro grupos [91],[92]. El primero se compone de modelos deterministas con mecanismos físicos que controlan la ruptura de las laderas, utilizando métodos matemáticos; generalmente se aplica para el análisis local de laderas, por el detalle de los datos utilizados. El segundo enfoque está basado en los inventarios de deslizamientos y en las evidencias de rupturas de las laderas, mediante el análisis de la distribución espacial y multitemporal de los patrones de actividades. El tercer bloque reúne un conjunto de procedimientos denominados heurísticos, apoyados en el conocimiento y la experiencia de especialistas en diversas disciplinas, como la geomorfología y la geotecnia. Soeters & van Westen[93] distinguen entre el análisis geomorfológico, propiamente dicho, y la cartografía temática. El cuarto grupo lo integran diversos métodos estadísticos para el análisis de la susceptibilidad y el peligro, así como las relaciones que se establecen entre la localización de los deslizamientos ocurridos en un territorio, en particular, y las variables geo-ambientales implicadas para predecir -con cierto grado de certeza- las áreas de iniciación de deslizamientos con similares combinaciones de factores[94].

Los estudios realizados sobre riesgos geomorfológicos se han clasificado en metodologías cualitativas, semicuantitativas y cuantitativas[95], que representan la función de la finalidad investigativa en el análisis de susceptibilidad por deslizamientos: descriptiva o explicativa. La finalidad explicativa tiene como objeto básico encontrar relaciones causales entre las variables, como describieron Glade y

[91] Soeters, R. and Cees J. Van Westen. "Slope Instability Recognition, Analysis, and Zonation." In *Landslides: Investigation and Mitigation*, edited by A. K. Turner and R. L. Schuster, 129-177. Washington, D.C.: National Research Council, 1996.
[92] van Westen, Cees J., T. W. J. van Asch and R. Soeters. "Landslide Hazard and Risk Zonation—Why Is It Still So Difficult?" *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 65, no. 2 (2006): 167-184.
[93] Soeters, R. and Cees J. Van Westen. Ibidem
[94] van Westen, Cees J., T. W. J. van Asch and R. Soeters. 2006, *Ibídem.*
[95] Corominas, J., et all. 2013. Ibidem

Crozier[96]. El objetivo puede obtenerse mediante metodologías experimentales, tales como los estudios *in situ* o de laboratorio, o no experimentales, como la identificación en campo de los deslizamientos.

Los trabajos geotécnicos representan un buen ejemplo de cómo la vía experimental permite contrastar y estimar la magnitud e intensidad de los efectos entre las variables causales y las variables efectos. Para los especialistas no resulta extraordinario la acumulación de conocimiento teórico sobre las fuentes de variación entre las relaciones causales de los deslizamientos y el diseño de procedimientos de control experimental de variables que intervienen en el fenómeno, tales como los procesos de bloqueo y aleatorización[97]. Sin embargo, cuando se pretende integrar la escala media –entre 1: 50,000 y 1: 100,000 de los riesgos geomorfológicos-, las predicciones pueden ser muy difíciles de realizar, pues a menudo resulta imposible evaluar la distribución espacial y temporal de los factores, debido a la carencia de procedimientos que permitan controlar experimentalmente la obtención de información. Esta situación se ha resuelto en disciplinas como la psicología, la sociología, la epidemiología y las ciencias políticas, mediante la explicación de todas las variables que intervienen en el estudio.

Chung y Fabri[98] detectaron y analizaron cinco tipos de deficiencias asociadas comúnmente con los modelos cuantitativos utilizados en la predicción de deslizamientos: *i*) simplificación de los datos de entrada; *ii*) mezcla de variables de tipo categóricas y continuas; *iii*) ausencia en la declaración de supuestos; *iv*) problemas en la validación de los resultados predichos, y *v*) inconsistencias en la estimación de las probabilidades de los futuros deslizamientos.

[96] Crozier, Michel J. & Glade, Thomas. 2005. Ibidem
[97] Box, George E. P., J. Stuart Hunter and William G. Hunter. *Estadística para Investigadores: Diseño, Innovación y Descubrimiento*. Barcelona: Reverté, 2008.
[98] Chung, Chang-Jo F. and Andrea G. Fabbri. "Systematic Procedures of Landslide Hazard Mapping for Risk Assessment Using Spatial Prediction Models." In *Landslide Hazard and Risk*, edited by Thomas Glade, Malcolm Anderson and Michael J. Crozier, 139-174: John Wiley & Sons, Ltd, 2004.

Los conjuntos de métodos estadísticos aplicados con éxito en el análisis cuantitativo pueden consultarse en los trabajos de Corominas y colaboradores[99] y J. Chacón *et al*[100]. Los procedimientos estadísticos más utilizados en los últimos años son el análisis discriminante, la regresión logística, las redes neuronales, la lógica difusa y los índices de probabilidades. Conviene señalar que, en función de la técnica estadística empleada, cambia el significado de la probabilidad espacial asignada. Estos cambios, aun siendo sutiles, se deben principalmente a la tipología de variables utilizadas (discretas o continuas), así como a la conversión de las mismas por los diferentes paquetes de análisis estadístico.

Otras técnicas estadísticas son los métodos bivariantes, donde el factor dependiente y los deslizamientos se contrastan con uno independiente; por ejemplo, la litología superficial. Así, el peso de cada factor independiente se analiza, de manera separada, mediante combinaciones algebraicas de mapas con nuevas variables que influyen en el movimiento de la ladera, mediante índices probabilísticos, como la densidad de deslizamientos para cada variable o el peso específico de cada factor.

Para integrar y combinar toda la información se utilizan las funciones de favorabilidad[101], que consisten en transformar cada clase continua o discreta para cada factor estudiado, en un valor entre 0 y 1. Posteriormente, estos factores se combinan entre sí, mediante reglas de integración, y sus resultados se interpretan en términos de probabilidad, según diferentes teoremas como el Teorema de Bayes o el Teorema de Certeza.

Aunque los factores causales utilizados pueden ser muy heterogéneos -tratándose de diferentes tipos de datos, continuos, discretos y categóricos-, todos

[99] Corominas, J., et. al. 2013. *Ibidem*.
[100] Chacón, J., C. Irigaray, T. Fernández and R. El Hamdouni. "Engineering Geology Maps: Landslides and Geographical Information Systems." *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 65, no. 4 (2006): 341-411.
[101] Chung, C. F. and Fabbri, A. G. "The representation of geoscience information for data integration". *Nonrenewable Resources* 2 no. 2, (1993):122–139

ellos son transformados homogéneamente mediante las funciones de favorabilidad. Esta podría ser considerada como la susceptibilidad (posibilidad, probabilidad, certeza etc.) de las diferentes unidades o valores dentro de una capa dada. Así, las expresiones de FF permiten determinar la susceptibilidad de un terreno a los deslizamientos, en función de las características de cada área.

Para definir la probabilidad de encontrar un deslizamiento en la zona de estudio, se utiliza la expresión:

Valor de Favorabilidad = 1 - (1 - 1/ AC) ACD Ecuación 1

donde *AC*: área de la clase y *ACD:* área de la clase afectada por deslizamientos.

La susceptibilidad del terreno a producir un deslizamiento puede ser estimado por medio de un análisis bivariante, estableciendo relaciones entre deslizamientos pasados y cada uno de los factores involucrados. Los valores de favorabilidad para cada factor deben ser integrados respecto a una regla o función de integración específica, que dependerá del marco matemático utilizado.

Las metodologías estadísticas multivariadas más utilizadas aplicadas al análisis de susceptibilidad incluyen las técnicas de análisis discriminantes en los trabajos de Alberto Carrara[102]; Carrara *et al.*[103] y [104]; Fausto Guzzetti *et al.*[105]; Cristina Baeza y

[102] Carrara, A. "Multivariate Models for Landslide Hazard Evaluation." *Mathematical Geology* 15, no. 3 (1983): 403-426.
[103] Carrara, A. et. al., 1991. *Ibidem*
[104] Carrara, A., M. Cardinali and F. Guzzetti. "Uncertainty in Assessing Landslide Hazard and Risk." *ITC Journal* 2, (1992): 172-183.
[105] Guzzetti, Fausto, Alberto Carrara, Mauro Cardinali and Paola Reichenbach. "Landslide Hazard Evaluation: A Review of Current Techniques and Their Application in a Multi-Scale Study, Central Italy." *Geomorphology* 31, (1999): 181-216.

Jordi Corominas[106]; F. Ardizzone *et al.*[107]; M. Cardinali *et al.*[108]; Sanwei He *et al.* [109]; Jia-Jyun Dong *et al.* [110]; Wenbo Xu *et al.*[111] y Alessandro C. Mondini *et al.*[112], entre otros.

El otro procedimiento multivariado es el análisis de regresión logística, que resulta el más utilizado en trabajos de susceptibilidad, como los de A. Carrara *et al.*[113], el trabajo de Atkinson y Massari, en el centro de Italia[114]; Rowbotham & Dudycha, en Nepal[115], los trabajos de Dai *et al.*, en Hong Kong[116], [117], [118]; Gregory

[106] Baeza, Cristina and Jordi Corominas. "Assessment of Shallow Landslide Susceptibility by Means of Multivariate Statistical Techniques." *Earth Surface Processes and Landforms* 26, no. 12 (2001): 1251-1263.
[107] Ardizzone, F., M. Cardinali, Alberto Carrara, Fausto Guzzetti and Paola Reichenbach. "Impact of Mapping Errors on the Reliability of Landslide Hazard Maps." *Natural Hazards and Earth System Sciences* 2, (2002): 3-14.
[108] Cardinali, M., P. Reichenbach, F. Guzzetti, F. Ardizzone, G. Antonini, M. Galli, M. Cacciano, M. Castellani and P. Salvati. "A Geomorphological Approach to the Estimation of Landslide Hazards and Risks in Umbria, Central Italy." *Natural Hazards and Earth System Sciences* 2, (2002): 57–72
[109] He, Sanwei, Peng Pan, Lan Dai, Haijun Wang and Jiping Liu. "Application of Kernel-Based Fisher Discriminant Analysis to Map Landslide Susceptibility in the Qinggan River Delta, Three Gorges, China." *Geomorphology* 171-172, (2012): 30-41
[110] Dong, Jia-Jyun, Yu-Hsiang Tung, Chien-Chih Chen, Jyh-Jong Liao and Yii-Wen Pan. "Discriminant Analysis of the Geomorphic Characteristics and Stability of Landslide Dams." *Geomorphology* 110, no. 3-4 (2009): 162-171
[111] Xu, Wenbo, Shaocai Jing, Wenjuan Yu, Zhaoxian Wang, Guoping Zhang and Jianxi Huang. "A Comparison between Bayes Discriminant Analysis and Logistic Regression for Prediction of Debris Flow in Southwest Sichuan, China." *Geomorphology* 201, (2013): 45-51.
[112] Mondini, Alessandro C., Ivan Marchesini, Mauro Rossi, Kang-Tsung Chang, Guido Pasquariello and Fausto Guzzetti. "Bayesian Framework for Mapping and Classifying Shallow Landslides Exploiting Remote Sensing and Topographic Data." *Geomorphology* 201, (2013): 135-147.
[113] Carrara, A., et al 1992. Ibidem
[114] Atkinson, P. M. and R. Massari. "Generalised Linear Modelling of Susceptibility to Landsliding in the Cental Apennines, Italy." *Computers & Geosciences* 24, no. 4 (1998): 373-385.
[115] Rowbotham, D. and D. N. Dudycha. "Gis Modelling of Slope Stability in Phewa Tal Watershed, Nepal." *Geomorphology* 26, (1998): 151– 170.
[116] Dai, F. C., et al. 2002. *Ibidem*.
[117] Dai, F. C. and C. F. Lee. "A Spatiotemporal Probabilistic Modelling of Storm-Induced Shallow Landsliding Using Aerial Photographs and Logistic Regression." *Earth Surface Processes and Landforms* 28, no. 5 (2003): 527-545.
[118] Dai, F. C., C. F. Lee, L. G. Tham, K. C. Ng and W. L. Shum. "Logistic Regression Modelling of Storm-Induced Shallow Landsliding in Time and Space on Natural Terrain of Lantau Island, Hong Kong." *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 63, no. 4 (2004): 315-327.

Olhmacher[119], [120]; los de Saro Lee *et al.,* en la península coreana y el sudeste asiático[121], [122], [123], [124], [125]; los trabajos de Süzen y Doyuran, en Turquía[126], y los de L. Ayalew, H. Yamagishi, Hideaki Marui y Takami Kanno[127], [128] en el archipiélago japonés.

Las estadísticas multivariables estudian la interacción y la dependencia de un conjunto de factores que actúan simultáneamente a la ocurrencia de deslizamientos, estableciendo el grado de implicación que tiene cada uno de los factores. Por esto, puede considerarse que se trata de una aproximación más objetiva que las obtenidas mediante otras técnicas, por ser un procedimiento que brinda buenos resultados en la predicción espacial de deslizamientos. La popularidad de estas técnicas se ha incrementado en los últimos años, como lo demuestran los trabajos de Brenning

[119] Ohlmacher, Gregory C. and John C. Davis. "Using Multiple Logistic Regression and Gis Technology to Predict Landslide Hazard in Northeast Kansas, USA." *Engineering Geology* 69, no. 3-4 (2003): 331-343.
[120] Ohlmacher, Gregory C. "Plan Curvature and Landslide Probability in Regions Dominated by Earth Flows and Earth Slides." *Engineering Geology* 91, no. 2-4 (2007): 117-134.
[121] Lee, Saro, Jaewon Choi and Kyungduck Min. "Landslide Susceptibility Analysis and Verification Using the Bayesian Probability Model." *Environmental Geology* 43, no. 1-2 (2002): 120-131.
[122] Lee, Saro. "Application of Likelihood Ratio and Logistic Regression Models to Landslide Susceptibility Mapping Using Gis." *Environmental Management* 34, no. 2 (2004): 223-232.
[123] Lee, Saro. "Application of Logistic Regression Model and Its Validation for Landslide Susceptibility Mapping Using Gis and Remote Sensing Data." International Journal of Remote Sensing 26, no. 7 (2005): 1477-1491.
[124] Lee, Saro. "Application and Verification of Fuzzy Algebraic Operators to Landslide Susceptibility Mapping." *Environmental Geology* 52, no. 4 (2006): 615-623.
[125] Lee, S. and Jasmi Abdul Talib. "Probabilistic Landslide Susceptibility and Factor Effect Analysis." *Environmental Geology* 47, no. 7 (2005): 982-990.
[126] Süzen, Mehmet Lütfi and Vedat Doyuran. "A Comparison of the Gis Based Landslide Susceptibility Assessment Methods: Multivariate Versus Bivariate." *Environmental Geology* 45, no. 5 (2004): 665-679.
[127] Ayalew, Lulseged, Hiromitsu Yamagishi, Hideaki Marui and Takami Kanno. "Landslides in Sado Island of Japan: Part I. Case Studies, Monitoring Techniques and Environmental Considerations." *Engineering Geology* 81, no. 4 (2005a): 419-431.
[128] Ayalew, Lulseged, Hiromitsu Yamagishi, Hideaki Marui and Takami Kanno. "Landslides in Sado Island of Japan: Part II. Gis-Based Susceptibility Mapping with Comparisons of Results from Two Methods and Verifications." *Engineering Geology* 81, no. 4 (2005a): 432-445.

[129],[130],[131],[132] y Vorpahl *et al.* [133] en los Andes Ecuatorianos; Santiago Beguería, en el norte de España[134] y Catani *et al*.[135], en la cuenca del Río Arno, Italia, entre otros.

Según se desprende de los párrafos anteriores, y a pesar de la amplia variedad de técnicas estadísticas, los procedimientos más utilizados en los análisis de susceptibilidad son la regresión logística múltiple y el análisis discriminante. Ambas técnicas se fundamentan en la solución de funciones basadas en combinaciones lineales de aquellos factores que poseen una mayor significación estadística en la definición de la presencia/ausencia de la variable dependiente; es decir, el deslizamiento de ladera.

La regresión logística utiliza el análisis de las variables independientes asociadas a los deslizamientos individuales; mientras que, para el análisis discriminante, el análisis de atributos está asociado a unidades cartográficas.

Hansen[136] define la unidad cartográfica como un área en el terreno, que contiene condiciones que difieren de las adyacentes por medio de límites definidos. De acuerdo a la escala de análisis, la unidad cartográfica representa el dominio espacial que maximiza la homogeneidad interna y la heterogeneidad entre unidades.

---

[129] Brenning, A. "Spatial Prediction Models for Landslide Hazards: Review, Comparison and Evaluation." *Natural Hazards and Earth System Sciences* 5, (2005): 853–862.
[130] Brenning, A. and Trombotto, D.: "Logistic regression modeling of rock glacier and glacier distribution: Topographic and climatic controls in the semi-arid Andes", *Geomorphology* no. 81, (2006) 141–154.
[131] Brenning, A.: "Spatial cross-validation and bootstrap for the assessment of prediction rules in remote sensing: The R package sperrorest", *IEEE Int. Symp. Geosci. Remote* S., (2012): 5372–5375, doi:10.1109/IGARSS.2012.6352393.
[132] Brenning, A., M. Schwinn, A. P. Ruiz-Páez and J. Muenchow. "Landslide Susceptibility near Highways Is Increased by 1 Order of Magnitude in the Andes of Southern Ecuador, Loja Province." *Natural Hazards and Earth System Science* 15, no. 1 (2015): 45-57.
[133] Vorpahl, Peter, Helmut Elsenbeer, Michael Märker and Boris Schröder. "How Can Statistical Models Help to Determine Driving Factors of Landslides?" *Ecological Modelling* 239, (2012): 27-39.
[134] Beguería, Santiago. "Validation and Evaluation of Predictive Models in Hazard Assessment and Risk Management." *Natural Hazards* 37, no. 3 (2006): 315-329.
[135] Catani, F., D. Lagomarsino, S. Segoni and V. Tofani. "Landslide Susceptibility Estimation by Random Forests Technique: Sensitivity and Scaling Issues." *Natural Hazards and Earth System Science* 13, no. 11 (2013): 2815-2831.
[136] Hansen, A. 1984. *Ibidem.*

Estas unidades pueden agruparse en cinco clases:[137] 1) Celdas o teselas *Grid*; 2) Unidades de terreno; 3) Unidades de condición única; 4) Unidades de ladera y 5) Unidades topográficas. A continuación, se describen sus rasgos sobresalientes:

Las Celdas o teselas *Grid*, son porciones predefinidas de archivos *rasters*, empleados por los usuarios de los Sistemas de Información Geográfica; y donde a cada una se le asigna el valor correspondiente por cada factor causal o disparador. Las Unidades de terreno son divisiones del territorio utilizadas en los trabajos geomorfológicos para la descripción de las interrelaciones entre génesis, formas y edades del relieve. Las Unidades de condición única son clasificaciones de factores individuales de inestabilidad agrupadas en un mapa que, al sobreponerse, proporciona unidades homogéneas (únicas), cuyo número, tamaño y naturaleza dependerán del criterio utilizado en la clasificación de los factores de entrada. Las Unidades de ladera son porciones de vertientes obtenidas mediante un Modelo Digital de Elevación, a partir de las divisorias de las aguas. Por último, las Unidades topográficas son subdivisiones de las Unidades de ladera, definidas por las intersecciones de las curvas de nivel con los límites de flujos ortogonales a las mismas.

La selección de una adecuada unidad cartográfica depende de diversos de factores: el tipo de deslizamiento, la escala de la investigación, la calidad, resolución, escala y tipo del área afectada, y el tiempo de recurrencia. En este trabajo se aplican las unidades de terreno de tipos geomorfológicos, bajo un enfoque crono-morfo-genético, desarrollado por Hernández-Santana y colaboradores[138] en el estado de Chiapas, México.

[137] Guzzetti, Fausto, Alberto Carrara, Mauro Cardinali and Paola Reichenbach. "Landslide Hazard Evaluation: A Review of Current Techniques and Their Application in a Multi-Scale Study, Central Italy." *Geomorphology* 31, (1999): 181-216.

[138] Hernández Santana, José Ramón, Manuel Bollo Manent, Ana Patricia Méndez Linares and José Manuel Figueroa Mah Eng. "Formación y morfogénesis del relieve del extremo noroccidental del estado de Chiapas, México." *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, no. 68 (2009): 25-40.

La construcción de modelos estadísticos y los resultados finales dependen de múltiples factores[139], tales como los métodos de clasificación; los predictores; el tipo y calidad del inventario de deslizamientos; la resolución espacial de los datos de entrada; el número de unidades cartográficas; el muestro aplicado y los tamaños de las muestras.

Los procedimientos de validación resultan muy importantes en el análisis de la modelización. En un primer momento, los modelos cuantitativos de deslizamientos fueron validados heurísticamente, mediante la comparación de la cartografía de inventario de los deslizamientos, con la susceptibilidad extraída de la cartografía producto de factores, tal como lo describen Steger *et al.*[140]. Posteriormente, las medidas de rendimiento de los modelos se realizaron con procedimientos de evaluación más rigurosos, como las áreas bajo la curva ROC (*Receiver Operating Characteristic*)[141],[142], o el área bajo la curva de predicción[143].

II.3. Marco conceptual para el estudio de la susceptibilidad mediante la Minería de Datos.

Los métodos geomorfológicos son métodos directos que evalúan la susceptibilidad a los deslizamientos, y están fundamentados en la experiencia del intérprete y el conocimiento de las condiciones del terreno para determinar el grado directo de susceptibilidad. Las metodologías estadísticas son métodos indirectos,

[139] Steger, Stefan, Alexander Brenning, Rainer Bell, Helene Petschko and Thomas Glade. "Exploring Discrepancies between Quantitative Validation Results and the Geomorphic Plausibility of Statistical Landslide Susceptibility Maps." *Geomorphology* 262, (2016): 8-23.
[140] Steger, Stefan et all. 2016. Ibidem
[141] Brenning, A. "Spatial Prediction Models for Landslide Hazards: Review, Comparison and Evaluation." *Natural Hazards and Earth System Sciences* 5, (2005): 853–862.
[142] Frattini, Paolo, Giovanni Crosta and Alberto Carrara. "Techniques for Evaluating the Performance of Landslide Susceptibility Models." *Engineering Geology* 111, no. 1-4 (2010): 62-72.
[143] Chung, Chang-Jo F. and Andrea G. Fabbri. "Validation of Spatial Prediction Models for Landslide Hazard Mapping." *Natural Hazards* 30, (2003): 451-472

basados en la información obtenida de las relaciones entre los factores causales preparatorios y la distribución de los deslizamientos. [144]

Dai, Lee y Ngai[145] definieron el "riesgo geomorfológico" como la probabilidad que ocurra un proceso geomorfológico con una magnitud específica, en un período y área determinada. La expresión matemática del riesgo geomorfológico es el producto de la siguiente probabilidad condicional:

$$R(P\ ) = \mathrm{P(H)} \times P(S \mid H) \times V(P \mid S) \times E \qquad \text{Ecuación 2}$$

donde:

R (*PD*)= riesgo geomorfológico por deslizamiento (valor de la pérdida anual de la propiedad); *P(H*)= probabilidad anual de ocurrencia del evento de deslizamiento; *P* (*S*/*H*) = probabilidad anual del impacto espacial de un evento de determinada magnitud; V(*P*/*S*) = vulnerabilidad de la propiedad y *E*= elemento en riesgo.

En el presente trabajo, el producto de $\mathrm{P(H)} \times P(S \mid H)$ sirve como una definición adecuada del riesgo geomorfológico por deslizamiento, tal como lo plantea Korup[146]. La probabilidad espacial de ocurrencia de un deslizamiento también se conoce como susceptibilidad[147]; lo que representa la probabilidad de que cualquier territorio se vea afectado por deslizamientos de tierra, dado un conjunto de condiciones ambientales. A esa expresión también se le conoce como peligro relativo[148].

[144] Van Westen C.J. (1993). *Application of Geographical Information System to landslide hazard zonation*. ITC Publication no. 15, ITC, Enschede, The Netherlands, 245 pp.
[145] Dai, F. C., C. F. Lee and Y. Y. Ngai. "Landslide Risk Assessment and Management: An Overview." *Engineering Geology* 64, (2002): 65–87.
[146] Korup, Oliver. "Geomorphic Hazard Assessment of Landslide Dams in South Westland, New Zealand: Fundamental Problems and Approaches." *Geomorphology* 66, no. 1-4 (2005): 167-188.
[147] Brabb, Earl E. "Innovative Approaches to Landslide Hazard and Risk Mapping." In *Proceedings of the 4th International Symposium on Landslides*, 1, 307-323. Toronto, Canada, 1984.
[148] Einstein, H. "Special Lecture: Landslide Risk Assessment Procedure." In *Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides*, 2, 1075-1090. Lausanne, Switzerland, 1988.

Guzzetti y colaboradores[149] consideran probabilísticamente la susceptibilidad *S*, a la condición de un territorio *L*, que se ve afectado por deslizamientos cuando:

$$S = P[(L\ e\ \ v \quad ,d \quad q \ : \{g \quad ía, li \quad ía, u \quad d\ \ s \quad ,e\ \ \}] \quad \text{Ecuación 3}$$

La ecuación anterior funciona bajo la hipótesis de que los deslizamientos que se producirán en un futuro tienen más probabilidades de ocurrir bajo las mismas condiciones ambientales que ocurrieron en el pasado y transcurren actualmente[150]. Empero, se debe tener cautela al aplicar este principio, conocido como "actualismo", porque no funciona para los deslizamientos.

Tal como describen Guzetti y sus colaboradores[151], en un deslizamiento nuevo las rupturas se producen en condiciones de máxima resistencia de los materiales (fricción y cohesión); mientras que las reactivaciones ocurren en condiciones residuales intermedias o bajas. La consecuencia morfológica obvia de un movimiento en la ladera es el cambio en el perfil y, por ende, en las condiciones hidrológicas del terreno. Algunas de las variables ambientales antrópicas se modifican (usos del suelo, vegetación, infraestructura, etc.), puesto que cada deslizamiento ocurre en condiciones ambientales distintas al pasado, por lo cual, probablemente, será diferente en el futuro. A pesar de los anteriores supuestos, este trabajo sostiene el principio del *uniformismo*, pues resulta "estadísticamente controlable". Por tanto, si los deslizamientos ocurren en condiciones ambientales promedio, similares al pasado, entonces el conocimiento empírico sobre los riesgos geomorfológicos es razonablemente exacto.

Como se plantea en los objetivos, esta tesis se orienta a la predicción de escenarios resultantes de *R (PD);* es decir, pretende encontrar las mejores relaciones

---

[149] Guzzetti, Fausto, Paola Reichenbach, Mauro Cardinali, Mirco Galli and Francesca Ardizzone. "Probabilistic Landslide Hazard Assessment at the Basin Scale." *Geomorphology* 72, no. 1-4 (2005): 272-299.

[150] Carrara, A., M. Cardinali, R. Detti, F. Guzzetti, V. Pasqui and P. Reichenbach. "Gis Techniques and Statistical Models in Evaluating Landslide Hazard." *Earth Surface Processes and Landforms* 16, (1991).

[151] Guzzetti, Fausto, Paola Reichenbach, Mauro Cardinali, Mirco Galli and Francesca Ardizzone. *Ibidem*

causales estadísticas entre las variables que definen el riesgo, identificando patrones mediante la *predictibilidad geoespacial*.

Llamamos *predictibilidad geoespacial* a la medida estadística de la clase de reproducción de patrones en los datos espaciales. Si en un conjunto de datos espaciales surgen patrones, la predictibilidad geoespacial indica qué tan probable es que esos patrones aparezcan en otro conjunto estadístico similar.

Una forma de enunciado es:

> Sea ***X*** un vector de características *n*-dimensionales, que representa un elemento de un conjunto de datos con *n* variables, la medida de *predictibilidad geoespacial* se puede calcular como *p (C|**X**)*, o la probabilidad de que un vector ***X*** pertenezca a la clase *C*.

II.4. Análisis de los deslizamientos por Minería de Datos.

El proceso de extracción de conocimientos en bases de datos o KDD, se define como el procedimiento interactivo, no trivial, de identificación de patrones válidos, previamente desconocidos, potencialmente útiles y comprensibles, a partir de los datos presentes en grandes bases de datos.[152]

De acuerdo a los anteriores autores, las etapas de la extracción del conocimiento en bases de datos es la siguiente (Figura 12):

1. Integración recopilación. Consiste en determinar las bases de la información disponible, la utilidad de las mismas y las estrategias para adquirirlas.

2. Selección, limpieza y transformación. Involucra la etapa más larga en el tiempo y de mayor esfuerzo. Como su nombre lo indica, consiste en la selección de los datos, la generación de la base de datos para su visualización

[152] Fayyad, U.M., G. Piatetskiy-Shapiro, P. Smith, and U. Ramasasmy. *Advances in knowledge discovery and data mining*. AAAI Press/MIT Press, 1996.

y consulta. El proceso de limpieza y transformación comprende diversas tareas, como el procesado previo, limpieza, reducción y transformación de los datos que se van a analizar.

3. Minería de datos. Es la etapa donde se aplican los métodos, tareas y algoritmos propios del reconocimiento de patrones e inteligencia artificial. Se conoce también como vista minable de datos.

4. Evaluación e interpretación. Los patrones extraídos en el paso anterior son interpretados y evaluados de acuerdo a mediciones que garanticen la identificación de patrones verdaderamente significativos (patrones que representen conocimiento). Algunas de estas mediciones podrían ser: *validación cruzada*, la cual divide los datos en dos conjuntos (entrenamiento y prueba); *matrices de confusión* (empleadas generalmente en problemas de clasificación), que indica cuantas clasificaciones se han hecho correctamente para cada tipo; entre otras.
5. Difusión y uso. En esta parte, el conocimiento extraído es incorporado en algún sistema o procedimiento para su difusión y uso de los usuarios finales. Este resultado debe ser examinado para descartar posibles errores en la representación del conocimiento.

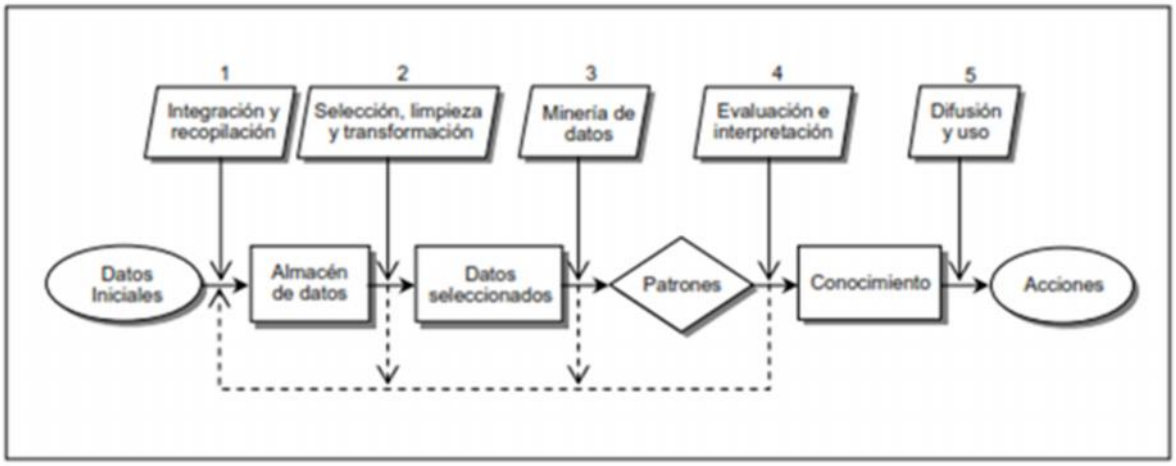

Figura 12. Etapas de la extracción del conocimiento en bases de datos. Modificado por el autor[153].

[153] Fayyad, U.M., G. Piatetskiy-Shapiro, P. Smith, and U. Ramasasmy. *Ibidem*.

Para los lectores interesados, el libro de Hernández Orallo y colaboradores[154] es una buena guía para adentrarse en el conocimiento de la minería de datos. El desarrollo de los temas tratados en estos apartados, sigue el esquema del texto citado.

La minería de datos es una fase fundamental de todo el proceso, influenciada directamente por todas las fases anteriores; en especial por las fases de selección, limpieza y transformación. Su objetivo principal es el análisis de los datos para extraer conocimiento en forma de relaciones, patrones o reglas inferidas de los datos (previamente) desconocidos; o bien, en forma de una descripción más concisa. Estas relaciones constituyen el modelo de los datos analizados.

Existen muchas formas distintas de representar los modelos y cada una de ellas determina el tipo de técnica que puede utilizarse para inferirlos. Los modelos pueden ser de dos tipos: predictivos y descriptivos.

- Modelos predictivos. Estiman valores futuros o desconocidos de variables de interés; también llamadas variables objetivos o dependientes, pues utilizan otras variables o atributos de la base de datos, mismas que se conocen como independientes o predictivas.

- Modelos descriptivos. Identifican patrones que explican o resumen los datos, y sirven para explotar las propiedades de los datos examinados; no para predecir nuevos datos.

De acuerdo a la naturaleza del problema abordado, las tareas de la minería de datos fueron:

1. Clasificación.

[154] Hernández J., Ramírez M. J. y Ferri C. *Introducción a la Minería de Datos*. Pearson Educación. Editorial Pearson Prentice Madrid, España. 2004

La clasificación es un problema de gran interés para los expertos del área de inteligencia artificial, ya que representa una de las principales tareas de minería de datos y se ubica dentro de los métodos de aprendizaje supervisado. En este ámbito, los datos de entrada -denominados conjunto de entrenamiento-, son instancias de las clases que se desean modelar e incluyen una serie de atributos o características.

Si se dispone de suficiente información almacenada, el modelo de clasificación se puede construir generalizando a partir de ejemplos específicos mediante algún proceso inductivo. Los elementos de entrenamiento utilizados en la construcción del modelo de clasificación suelen expresarse en términos de un conjunto finito de propiedades o atributos con valores discretos o numéricos.

Como pertenece a los métodos de aprendizaje supervisado, las categorías que han de asignarse a los distintos elementos deben establecerse con anterioridad. En general, estas clases son disjuntas -aunque pueden establecerse jerarquías-, y deberán ser discretas. Para predecir atributos con valores continuos se suelen definir categorías discretas, utilizando diversos términos; por ejemplo, rangos representados por etiquetas.

Las técnicas inductivas de clasificación se basan en el descubrimiento de patrones en los datos de entrada, por lo que se recomienda disponer de suficientes casos de entrenamiento[155], para obtener un modelo de clasificación confiable. Además, se necesitan suficientes datos para poder diferenciar patrones válidos de patrones debidos a irregularidades o errores; esta diferenciación suele realizarse utilizando alguna técnica estadística.

El objeto de la clasificación es disponer de una descripción precisa para cada clase, utilizando los atributos de los datos de entrada; de modo que el modelo obtenido pueda servir para clasificar casos o nuevos elementos cuyas clases se

[155] Han, Jiawei and Kamber, Micheline. *Data Mining: Concepts and Techniques*. Morgan Kaufmann Series, 2000.

desconozcan o, simplemente, para comprender mejor la información de que se dispone.

El proceso de clasificación se refiere a la asignación de nuevos elementos dentro de categorías o clases basados en un atributo predecible. Cada elemento u observación contiene un conjunto de atributos, así como sus valores correspondientes; y donde a cada uno de ellos se le conoce como el *atributo clase* (*atributo predecible*). La tarea consiste en encontrar un modelo que describa el atributo clase, en función de los valores de los atributos de entrada.

Este tipo de tarea se realiza en varias etapas: primero se crea el modelo; después un entrenamiento del mismo y luego se concluye con una etapa de prueba. Para entrenar un modelo de clasificación es necesario conocer el valor del atributo clase de cada elemento de entrada, dentro del conjunto de entrenamiento; el cual generalmente está constituido por datos históricos.

Los algoritmos de minería de datos que requieren un objetivo sobre el cual compararse y evaluarse son considerados algoritmos supervisados; así pues, las tareas de clasificación constituyen un ejemplo de este último tipo

Algoritmos de clasificación típicos son los árboles de clasificación, las redes neuronales, los k-vecinos más próximos y el clasificador Bayes. Los algoritmos de clasificación utilizados en el presente trabajo son CART; *Random Forest* y *TreeNet*.

2. Agrupamiento.

Se aplica para identificar grupos o conjuntos de elementos basados en los valores de sus atributos. Al finalizar el proceso es posible afirmar que los elementos de un mismo grupo tienen valores similares en el conjunto de atributos; es decir, poseen características semejantes y, al mismo tiempo, son distintos a los objetos de otro grupo. El agrupamiento constituye una tarea no supervisada de minería de datos, ya que no se contempla atributo alguno para guiar el proceso de entrenamiento, y todos son tratados de manera similar. Al agrupamiento también

se le conoce como segmentación, pues parte o segmenta los datos en grupos que pueden ser o no disjuntos.

La mayoría de los algoritmos de agrupamiento construyen el modelo mediante varias iteraciones sobre el conjunto de datos y se detienen cuando se detectan convergencias dentro del modelo; es decir, cuando las fronteras de estos segmentos o grupos permanecen estables durante un número determinado de iteraciones.

Los algoritmos de agrupamiento se pueden clasificar en agrupamiento exclusivo, agrupamiento traslapado, agrupamiento jerárquico y agrupamiento probabilístico. Ejemplos de éstos son el algoritmo de K-medias, algoritmo de C-medias difusas, agrupamiento jerárquico y mezcla Gaussianas.

3. Regresión.

La regresión es muy similar a la clasificación. La diferencia principal radica en que el atributo predecible o atributo clase no es referente a un dominio discreto, si no continuo. El modo de trabajo de estos algoritmos consiste en generar una función real que asigna a cada elemento del conjunto de datos un valor real, de modo que la función se ajuste a dicho conjunto. Posteriormente, se utilizan estos resultados para predecir el comportamiento de nuevos elementos al aplicarles dicha función.

El objetivo en este caso es minimizar el error (generalmente el error cuadrático medio), entre el valor predicho y el valor real. Las técnicas de regresión han constituido desde hace varias décadas un campo de estudio de los estadistas.

Los principales métodos de regresión incluyen a la regresión lineal, la regresión logística, árboles de regresión y redes neuronales. Los métodos de regresión utilizados en la tesis son MARS y *Logit*.

4. Predicción.

Como su nombre lo indica, la tarea de predicción proporciona elementos sustentados y congruentes para predecir el comportamiento de distintos fenómenos

o determinar tendencias basadas en historiales. Usualmente utiliza como datos de entrada un conjunto asociado con una o más variables de tiempo; por ejemplo, una serie de números continuos (series de tiempo). Estos datos contienen observaciones adyacentes y son dependientes del orden. La técnica más conocida se denomina ARIMA, por sus siglas en inglés de *AutoRegressive Integrated Moving Average*.

5. Asociación.

La problemática que enfrenta esta tarea consiste en analizar transacciones para identificar elementos que se repiten comúnmente entre ellas. La utilidad más práctica es reconocer conjuntos de elementos comunes, así como las reglas que les dan origen y, con ello, generar propuestas para obtener nuevos elementos.

En este contexto cada elemento, dicho de una manera general, cada par de datos atributo/valor, es considerado como un solo ente, mejor conocido como conjunto de datos o "*datasets*". La tarea pretende encontrar este conjunto de datos en otras transacciones, así como las reglas de asociación que les dan origen. La mayor parte de estos algoritmos encuentran estos elementos luego de múltiples iteraciones sobre el conjunto de datos. Existe un concepto muy importante dentro de esta tarea de minería de datos llamado *soporte*, que representa el límite de frecuencia mínimo considerado para cada conjunto de datos por analizar; es decir, un porcentaje mínimo de apariciones dentro del conjunto general.

Otras tareas de la minería de datos son el análisis de secuencia y el análisis de desviaciones.

II.5. Precisión del modelo de datos.

La precisión asociada a un modelo de clasificación sobre un conjunto de datos lo define Fayyad *et al*. [156] como el porcentaje de elementos del conjunto de pruebas que son correctamente etiquetados o catalogados por el clasificador, tomando en consideración el conjunto de reglas asociadas al modelo.

La precisión de un clasificador *C* se obtiene mediante la siguiente ecuación:

Precisión (*C*) =elementos bien clasificados / elementos totales Ecuación 4

La verosimilitud de las reglas de clasificación obtenidas posteriormente a la ejecución del algoritmo de clasificación, depende del estado de los datos en un tiempo dado; por ello, es un concepto que se modifica durante el tiempo. Si se desea conocer la precisión es necesario comparar la etiqueta o el valor del atributo clase original con el valor asociado por el clasificador en el mismo atributo clase para un conjunto de datos distinto al conjunto de datos de entrenamiento.

La precisión de un modelo clasificador permite determinar la utilidad práctica de este conjunto de reglas de clasificación, considerando el total de filas que se clasificaron efectivamente para cada una de las clases posibles. En ámbitos de reconocimiento de patrones, esta precisión se conoce como rango general de reconocimiento.

Otro término común en la precisión es el porcentaje de error o rango de clasificación errónea de un clasificador *S*, que consiste en evaluar 1-precisión *C*, donde *S* corresponde a la precisión del clasificador *C*.

Cuando se utiliza el conjunto de entrenamiento como conjunto de prueba para la estimación de la precisión, se conoce como error de reemplazo. Esta es una evaluación "optimista" del verdadero porcentaje de errores, porque el modelo no se ha comprobado con nuevos datos; a esto se le conoce como *sobre entrenamiento* del modelo.

[156] Fayyad, U.M., G. Piatetskiy-Shapiro, P. Smith, and U. Ramasasmy. *Ibidem*.

De acuerdo a los objetivos del presente trabajo, no interesaba medir la calidad de los modelos en términos de minimización de errores, si no de acuerdo a la optimización de los costos de los errores en la clasificación. Por ello, el algoritmo utilizado para la medición de la precisión fue el Análisis ROC (*Receiver Operating Characteristic*) o Análisis de Características Operativas del Receptor (ACOR).

El análisis ROC, utilizado ampliamente en los diagnósticos médicos, funciona bajo el supuesto de que se tienen dos clases para asignar y es una representación de la tasa de éxito (probabilidad de detectar correctamente un pixel, cuando dicho pixel pertenece a la clase de interés) frente a la tasa de falsa alarma (probabilidad de detectar un pixel cuando efectivamente no pertenece a la clase de interés).

Sea una clase *p* positiva y una clase *n* negativa, existen cuatro probables resultados a partir de un modelo de clasificación: si el resultado de la predicción es *p* y el valor actual es *p*, entonces se le conoce como un "Positivo Verdadero" (PV); por otro lado, si el valor de la predicción del modelo es *n*, entonces se trata de un "Positivo Falso" (PF). De modo similar, si el resultado de la predicción es *n*, y el actual es *n*, se denomina un "Negativo Verdadero" (NV); y si la predicción es *p*, el elemento se determina como un "Falso Negativo" (FN). En nuestro caso, el valor positivo *p* equivale a la presencia de deslizamiento (valor 1), y el valor negativo *n* equivale a la ausencia de deslizamiento (valor 0).

La siguiente tabla corresponde a la notación *Swets*, que describe el comportamiento de un sistema diagnóstico o de predicción con dos únicos posibles resultados: positivo o negativo.

		Estado real		
		Positivo	**Negativo**	**Total**
Predicción	**Positivo**	Positivo Verdadero (PV) a	Positivo Falso (PF) b	a + b
	Negativo	Negativo Falso (NF) c	Negativo Verdadero (NV) d	c + d
	Total	a + b	c + d	a + b + c + d

Tabla No. 1. Matriz de confusión para una tabla de contingencia de clasificación.

Con los resultados obtenidos, se definen las métricas que permiten evaluar los modelos de clasificación. Estos componentes resultan importantes, porque la mala asignación de un elemento contiene intrínsecamente un costo asociado. Lo importante no es obtener un modelo de clasificación que falle lo menos posible, si no uno que tenga un costo asociado menor. Para ello, se asocia a la matriz de confusión el costo en cada una de sus entradas y se determina el costo total de cada modelo. Un problema respecto a la matriz de costos es que no siempre se cuenta con esta información; además de que el costo final depende de dos elementos dependientes del contexto de cada problema:

a. El costo de los falsos positivos y falsos negativos: *FPcost* y *FNcost*.

b. El porcentaje de ejemplos de la clase negativa respecto de ejemplos de la clase positiva (Neg/Pos).

Conceptos	Siglas	Algoritmo
Tasa de PV (sensibilidad)	TPR	*TPR = PV/P = PV / (PV + NF)*
Rango de PF (falsa alarma)	PFR	*PFR = PF/N = PF / (PF + NV)*
Precisión	ACC	*ACC = (PV + NV) / (P + N)*
Especificación	SPC	*SPC = PV / (PF + NV) = 1- FPR*
Valor de predicción positiva	VPP	*VPP= PV / (PV + PF)*
Valor de predicción negativa	VPN	*VPN = NV / (NV + NF)*
Rango de descubrimiento falso	FDR	FDR= PF / (PF + PV)

Tabla No. 2. Terminología de una matriz de confusión para un problema de dos clases.

El valor predictivo constituye una medida esencial para evaluar la efectividad de un procedimiento de predicción, pues representa la probabilidad de que un resultado ha sido clasificado correctamente. Como concepto, resulta fundamental para interpretar una medición o una prueba diagnóstica, además de la presencia de signos. El *VPP* brinda una estimación sobre la probabilidad de que un evento con un resultado de prueba positivo tenga en realidad la *condición positiva*; el *VPN* da una estimación de que un evento con resultado de prueba negativo, de hecho, no tenga la de un valor probabilístico.

La utilización de los conceptos de sensibilidad, especificidad y valor predictivo para interpretar pruebas de hipótesis estadísticas mediante el análisis ROC, sugiere una analogía entre las pruebas estadísticas y las pruebas diagnósticas. La herramienta para la evaluación de las relaciones entre la evidencia indirecta y la decisión es la teoría de probabilidad bayesiana. Esta teoría es una extensión de la teoría de probabilidad clásica, que permite combinar una nueva evidencia sobre una hipótesis con previo conocimiento, para llegar a una estimación de la probabilidad para que la hipótesis sea verdadera. De acuerdo a lo anterior, el valor *p* se puede calcular como la probabilidad de observar un resultado extremo bajo una hipótesis H_0 (la inversa de la hipótesis de interés).

El enfoque bayesiano de la interpretación de los valores *p* trata de proporcionar una respuesta que se acerca más al objetivo original. Inicia con una probabilidad previa para la verdad de la hipótesis y luego se ajusta, basándose en los resultados de una investigación, para obtener una probabilidad posterior. El efecto que pueden tener los resultados sobre la evaluación de la credibilidad de la hipótesis depende de la evaluación original de su credibilidad.

Según el Teorema de Bayes, la probabilidad de que se produzca un deslizamiento condicionado por la ocurrencia conocida de otros eventos se expresa como:

$$p\,(h|e) = p\,(e|h) * p\,(h) / \sum_i p\,(e|h_i) * p\,(h_i) \qquad \text{Ecuación 5}$$

donde:

p (h|e) es la probabilidad de que un pixel se vea afectado por un nuevo deslizamiento (*probabilidad a posteriori*);

p (e|h) es la probabilidad de que un deslizamiento haya ocurrido en cada clase de cada factor; y

p (h) es la probabilidad de ocurrencia por cada clase de cada factor (*probabilidad a priori*).

II.6. Los algoritmos de la minería de datos para el modelado estadístico.

Para el tratamiento de la susceptibilidad se aplicaron ocho conjuntos de modelos estadísticos no paramétricos de clasificación y predicción -poco utilizados a nivel internacional-, sobre predicciones de la susceptibilidad a deslizamientos. A continuación, se describen brevemente:

CART (*Classification and Regression Trees*), es un algoritmo desarrollado por Breiman *et al*.[157] que genera árboles binarios (los nodos padres se dividen en dos nodos hijos) mediante particiones iterativas en un proceso que se puede repetir, tratando a su vez a cada nodo hijo como padre. El algoritmo busca los valores óptimos de corte entre todas las variables independientes para obtener una serie de divisiones binarias, de forma que se minimice la varianza dentro de cada nodo y se maximice entre nodos diferentes. Una vez obtenido el árbol que mejor clasifica los casos sin límite de complejidad, el algoritmo lo 'poda' o simplifica para evitar el sobreajuste (*overfitting*) de los datos. El resultado es un árbol por el que se desciende a partir de preguntas de tipo si/no. En función del tipo de variable dependiente se diferencian dos tipos de árboles: de regresión (variable dependiente continua) y de clasificación (variable discreta).

MARS (*Multivariate Adaptive Regression Splines*) es un método de regresión no paramétrica en la que no se hace ninguna suposición relativa a la relación funcional entre las variables dependientes e independientes. Se basa en la construcción de modelos flexibles, ajustando los datos a regresiones lineales parciales "segmento por segmento" (*piecewise*). Es decir, los modelos no lineales se aproximan mediante la utilización de regresiones lineales parciales (en distintos intervalos del conjunto de datos), donde la pendiente de la ecuación cambia de un intervalo a otro.

Un nodo indica el final de una regresión parcial y el principio de otra. Entre dos nodos consecutivos el modelo se define mediante una regresión lineal. Los nodos se seleccionan mediante un procedimiento de búsqueda que emplea un algoritmo paso a paso, similar al proceso de regresión lineal múltiple. El modelo generado está sobre ajustado y, posteriormente, se eliminan los nodos con menor relevancia a través de un criterio estadístico (mediante validación cruzada generalizada), y sólo se mantienen los más significativos.

[157] Breiman, L., Friedman, J.H., Olshen, R.A. & Stone, C.J. C*lassification and Regression Trees.* CRC Press, New York (1984)

Las llamadas funciones básicas (*basis functions*) representan la información contenida en una o más variables. Actúan como las nuevas variables independientes del modelo, y explican el efecto de una o varias variables respuesta sobre la variable independiente en cada intervalo (espacio entre dos nodos).

TreeNet es un modelo no paramétrico de árboles de clasificación y regresión pertenecientes al grupo denominado *Boosted regression trees* (BRT) o *Stochastic gradient boosting* [158], y consiste en la construcción de cientos a miles de árboles pequeños con seis nodos terminales. Cada árbol aporta una pequeña parte al modelo global, y la predicción del modelo final se construye con la suma de todas las contribuciones individuales de los árboles.

Los modelos lineales generalizados (*Generalized linear models*, GLM) son las técnicas más utilizadas en el análisis de la susceptibilidad por deslizamientos. Dentro de ellos, incluye la regresión logística y una versión más sofisticada y flexible, denominada *Generalized PathSeeker* (GPS). Los GLM emplean las variables independientes para crear un modelo matemático que prediga la probabilidad de que un evento ocurra en una determinada área. La familia de modelos de Salford Predictive Modeler es mucho más flexible con las características de las variables dependientes, ya que éstas pueden ser dicotómicas (presencia/ausencia) o categóricas.

[158] Friedman, J.H. "Greedy function approximation: a gradient boosting machine". *Ann. Stat.* 29, (2001): 1189–1232.

III. Caracterización físico-geográfica del área.

El territorio bajo estudio tiene una superficie de 458.22 km^2 (Figura 13), y ocupa parte de las cuencas hidrográficas de los ríos Laxaxalpan y Necaxa, íntimamente conectadas por túneles que transportan agua de la primera hacia la presa Nexapa, localizada en la segunda cuenca.

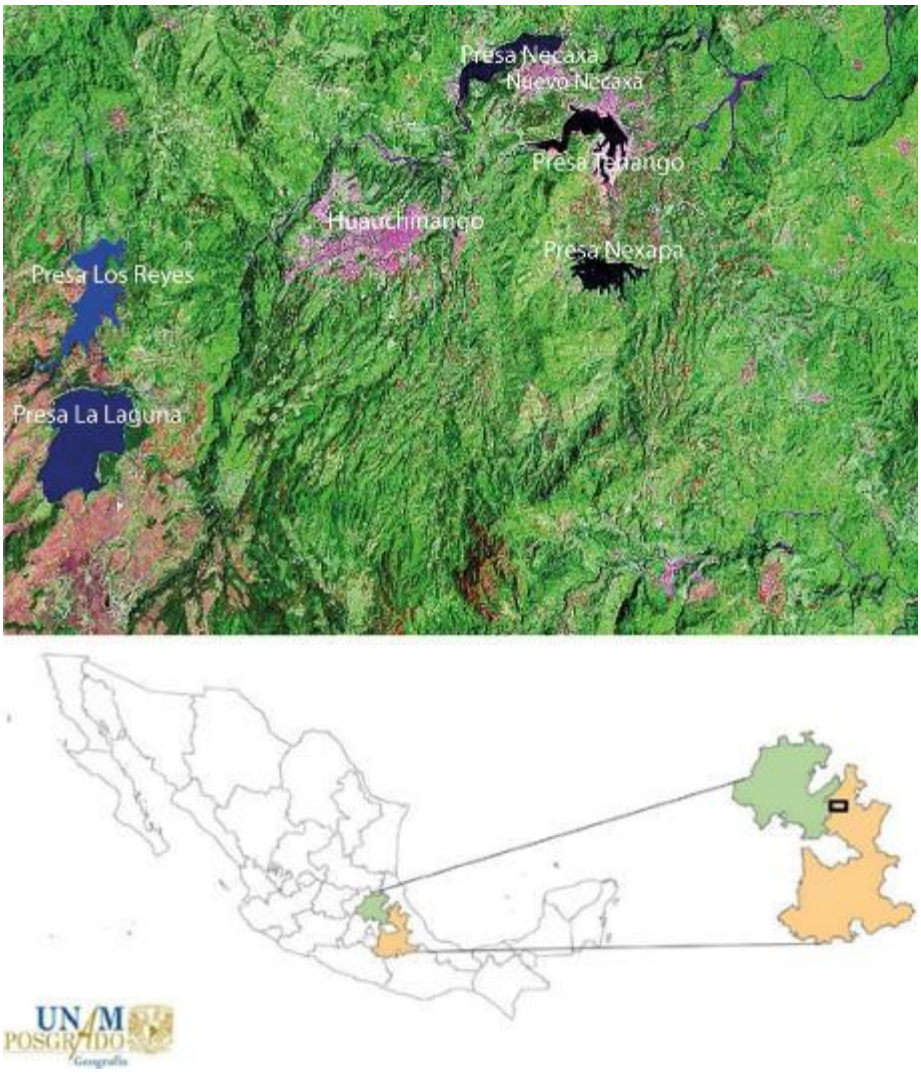

Figura 13. Localización del polígono de estudio con una imagen satelital LandSat ETM + en composición de color verdadero.

Comprende los municipios del estado de Hidalgo: Acaxochitlán y del estado de Puebla: Ahuazotepec, Chiconcuautla, Huauchinango, Juan Galindo, Naupan, Pahuatlán, Tlaola, Zacatlán y Zihuateutla.

En realidad, estos conjuntos de presas integran un sistema formado por cuatro centrales generadoras escalonadas y cinco reservorios de agua, interconectados por un complejo de ductos subterráneos y subaéreos; de éstos, cuatro están localizados en la cuenca hidrográfica (figura 14). La Central Hidroeléctrica de Necaxa genera 109,000 KW, con una caída estática de 443.0 m; la central hidroeléctrica Tezcapa genera 5,367.5 KW y una caída estática de 139.0 m; la central hidroeléctrica de Tepexic tiene una caída estática de 209.5 m y genera 45,000 KW; mientras que la central hidroeléctrica de Patla genera 45,600 KW, con una caída estática de 197.0 m.

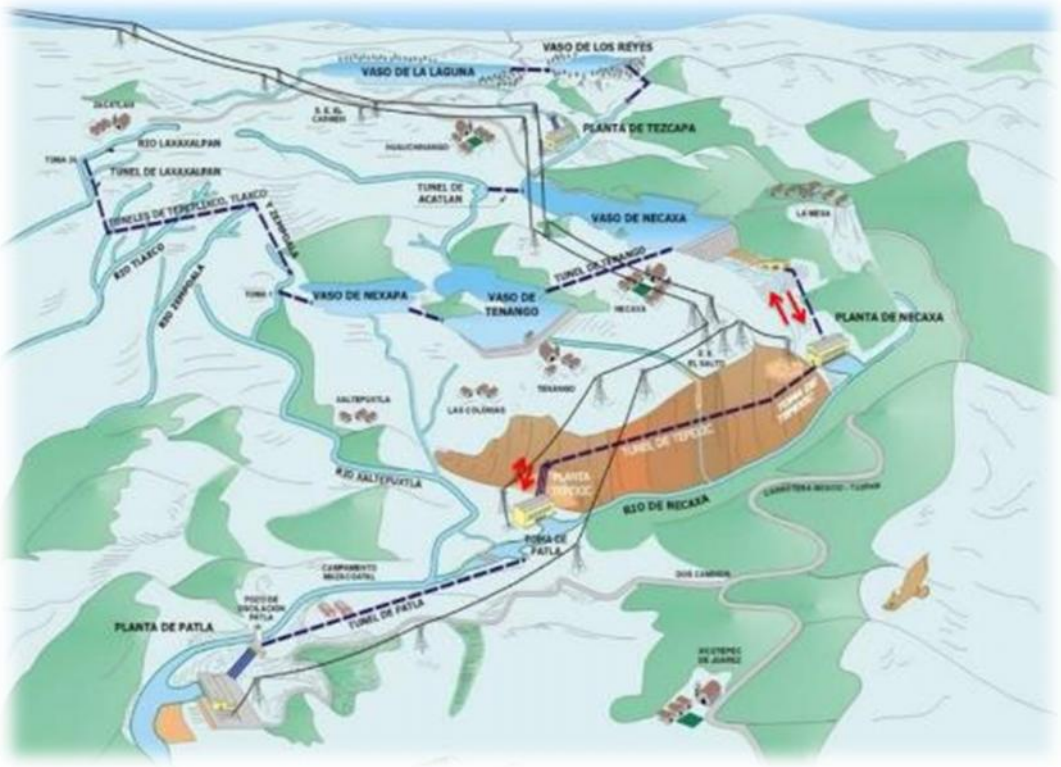

Figura 14. Componentes estructurales del Sistema Hidroeléctrico Necaxa, proporcionado al autor por el Ing. Edgar Muñoz Batalla, Superintendente "A", Departamento Hidráulico, Luz y Fuerza del Centro, 2006.

La edificación de la infraestructura hidráulica del sistema de la central de Necaxa inicia en 1903; y la producción de energía eléctrica a partir de 1905, mediante seis turbinas Francis de 5,000 KW cada una y 30 MW de potencia. Durante el siguiente medio siglo continuaron las obras, inaugurándose Tepexic en 1923 (figura 14), Tezcapa en 1928, y Patla en 1954 (figura 15).

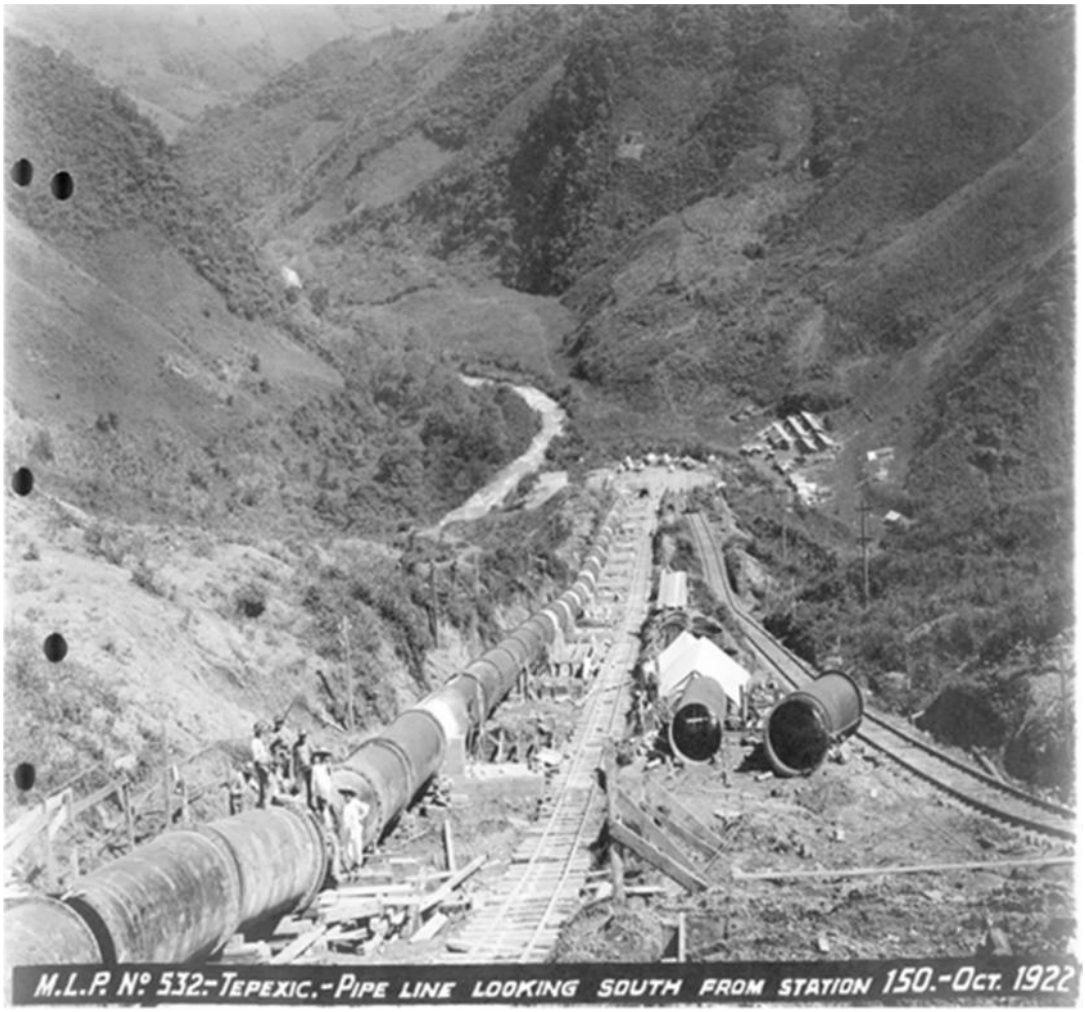

Figura 15. Instalación de las tuberías de caída de la Central Hidroeléctrica Tepexic[159].

Desde entonces, el sistema aprovechaba las aguas de las presas Laguna (43'500,000 m^3); Los Reyes (26'000,000 m^3); Nexapa (15'780,000 m^3); Tenango

[159] Archivo Histórico del Agua. *Aprovechamientos superficiales*, Caja 4,200, Expediente No. 56,644.

(43’000,000 m^3) y Necaxa (45’000,000 m^3), abarcando una superficie de captación en dos cuencas hidrográficas de aproximadamente 1,400 km^2, cerca de 30 km de canales y más de 50 km de túneles.

Figura 16. Tubería de caída y tanque de oscilación de la Central Hidroeléctrica Patla, Fotografía del autor, 2006.

Actualmente, la presa Necaxa posee una superficie de captación de 31,906 km^2; la cuenca de Tenango 10,931 km^2; la presa Los Reyes 5,925 km^2; La Laguna 3,412 km^2 y Nexapa, 102 km^2 (figura 16).

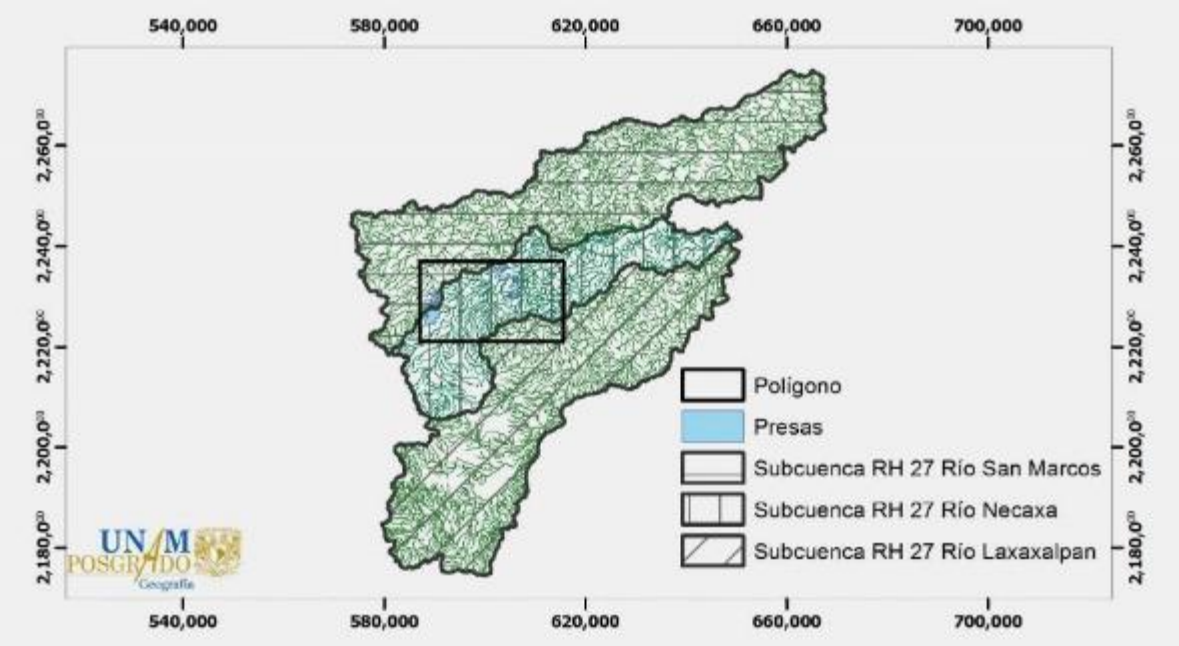

Figura 17. Subcuencas hidrológicas de captación de las presas del Sistema Hidroeléctrico de Necaxa.

III.1 Geología estructural y tectónica.

Desde el punto de vista morfoestructural[160], en la zona confluyen dos grandes unidades formadas por litologías diferentes. La primera, dominando la zona este y sur, forma parte del Eje Neovolcánico, con rocas volcánicas en secuencias de estratovolcanes, y aislada actividad moderna y cuencas tectónico – volcánicas; está ocupada por derrames lávicos, planicies proluviales y fluviolacustres. La segunda unidad, el orógeno Sierra Madre Oriental, corresponde a una faja de elevaciones plegadas, ocasionalmente con presencia de mantos de sobrecorrimiento, monoclinales y, ocasionalmente, cadenas basculadas y fuerte disección erosivo-kárstica.

[160] Hernández-Santana, José Ramón, José Lugo-Hubp Mario Arturo Ortiz-Pérez. "Morfoestructuras Regionales, NA III 1." En *Geomorfología*. Ciudad de México: Instituto de Geografía, UNAM, 2007.

En el Eje Neovolcánico coexisten estructuras de procedencia volcánica de origen Terciario hasta el Reciente, que sobreyacen a un paleorrelieve de extensos plegamientos afectados por fallas regionales, fosas y pilares tectónicos. El vulcanismo de finales del Terciario ocurrió por los sistemas de fallas y fracturas que se formaron después del plegamiento de las rocas sedimentarias durante la orogenia Laramide. El relieve lo componen extensas planicies de material piroclástico de distinta composición y derrames lávicos de composición media y básica, principalmente; edificios volcánicos con distinto grado de erosión, así como por un sistema de fallas con dirección preferente de suroeste a noreste.

La principal característica de la Sierra Madre Oriental es la presencia de una potente secuencia de rocas sedimentarias plegadas, tectonizadas; en algunos casos con intrusiones de cuerpos ígneos. Las litologías de las estructuras están compuestas por rocas metasedimentarias de edad Jurásico – Cretácico, plegadas por esfuerzos compresivos durante la orogenia Laramide, cuya dirección actuó de noreste a suroeste, formando los sinclinales y anticlinales que caracterizan al territorio bajo estudio. Los ejes estructurales plicativos poseen un rumbo dominante sureste a noreste que, en algunos casos, cabalgan a otras unidades litológicas de edad similar o, incluso, más antiguas.

III.2. Estratigrafía y Litología.

A partir de la compilación bibliográfica, la interpretación de fotografías aéreas e imágenes satelitales más el trabajo de campo, se construyó la cartografía geológica superficial, cuyas edades van desde el Jurásico Inferior al Holoceno, -desde la más antigua a la más reciente-, y brevemente descritas más adelante. Información más

detallada sobre las unidades formales cronoestratigráficas se puede consultar en Mooser *et al*[161], y en la página web del Servicio Geológico Mexicano[162].

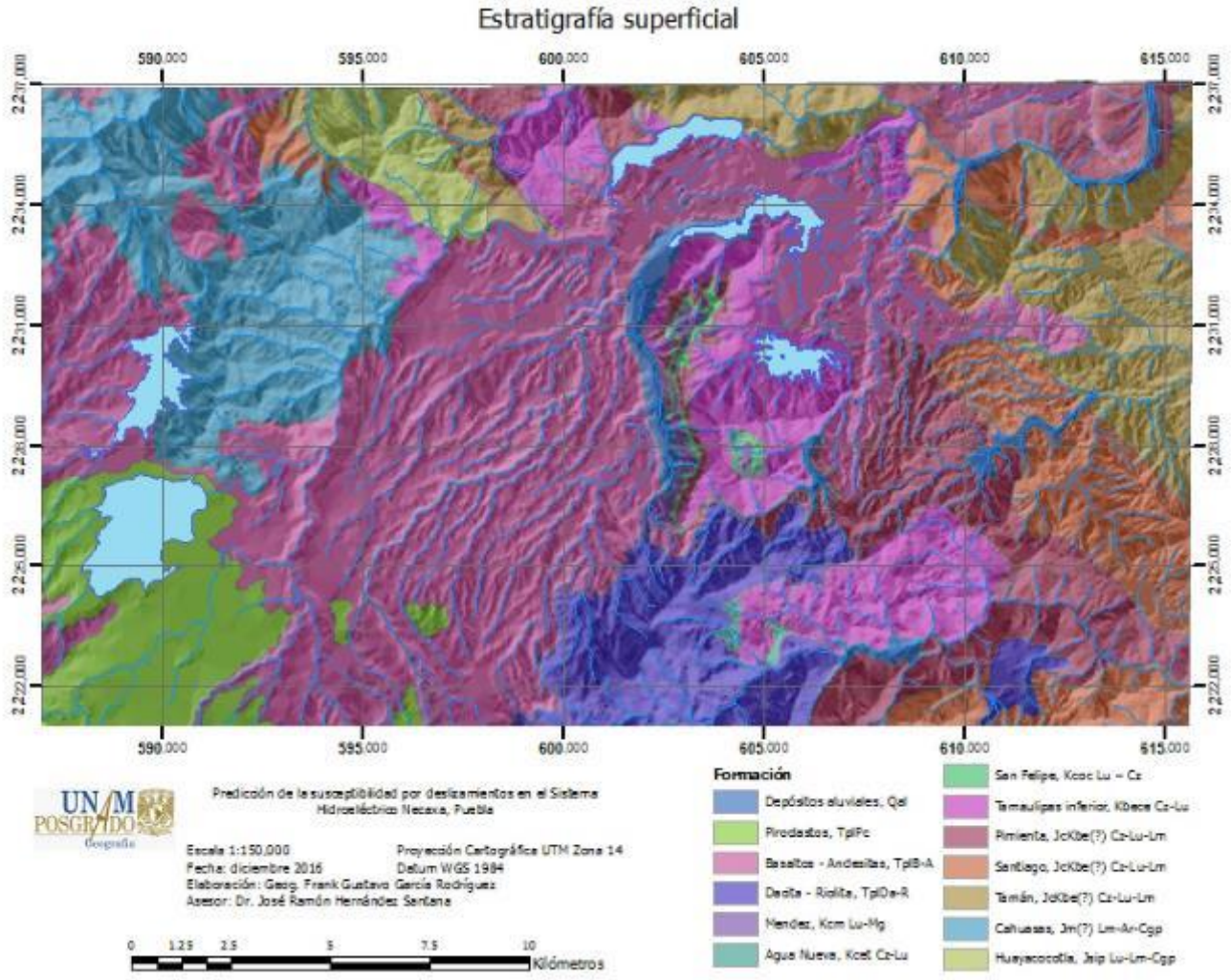

Figura 17. Mapa de litología superficial.

- ✓ Jurásico inferior (Jsip). Lutitas y limonitas, (Lu – Lm)

[161] Mooser, Federico, José A. Montiel, Ángel Zúñiga. *Nuevo mapa geológico de las Cuencas de México, Toluca y Puebla. Estratigrafía, tectónica regional y aspectos geotérmicos.* CFE, México, 1996.
[162], Servicio Geológico Mexicano, "Léxico Estratigráfico de México" http://www.sgm.gob.mx/Lexico_Es/default.html (accessed 15 de marzo 2012).

Dentro de este grupo, se encuentra la formación Huayacocotla, que aflora al NW de la presa Necaxa; compuesta por lutitas oscuras que intemperizan a color amarillo o rojo naranja, con intercalaciones de areniscas muy competentes y conglomerados, y escasos lentes de calizas. Posee abundantes fósiles de plantas y carbón en su base, mientras que en la cima aparecen plantas fósiles. La base de la formación, cuando está expuesta, generalmente es representada por una sección de 20 m de conglomerado y arenisca de grano grueso, sobreyacida por un intervalo de caliza arenosa de 40 a 50 m de espesor. El conglomerado contiene clastos de la subyacente formación Huizachal, que subyace discordantemente a la formación Cahuasas y suprayace, también, a la formación Huizachal.

✓ Jurásico medio (Jm). Limolitas – areniscas y conglomerados, (Lm - Ar - Cgp)

Al este del vaso de la presa Los Reyes aflora una secuencia de areniscas arcósicas y conglomerados de color rojo, depositada en un ambiente de tipo continental de fosas tectónicas. A esta unidad geológica se le denomina formación Cahuasas, y ocupa una franja de forma regular orientada de sureste a noroeste. Está formada por una secuencia terrígena continental constituida por limolitas de color café, areniscas de color gris claro a gris verdoso, areniscas conglomeráticas, y algunos horizontes de lutitas de color gris verde. Las areniscas están clasificadas como litarenitas, de grano fino a medio.

Las areniscas conglomeráticas son fragmentos de areniscas, sílice y andesitas, cuyos diámetros varían de 1 a 5 cm. En Xicotepec (Pue.), la unidad se vuelve más arenosa, apareciendo cartografiada como areniscas Jm (ar); y subyace con discordancia angular a rocas calcareo-arcillosas del Jurásico superior, correspondientes a las formaciones Tamán y Pimienta, respectivamente.

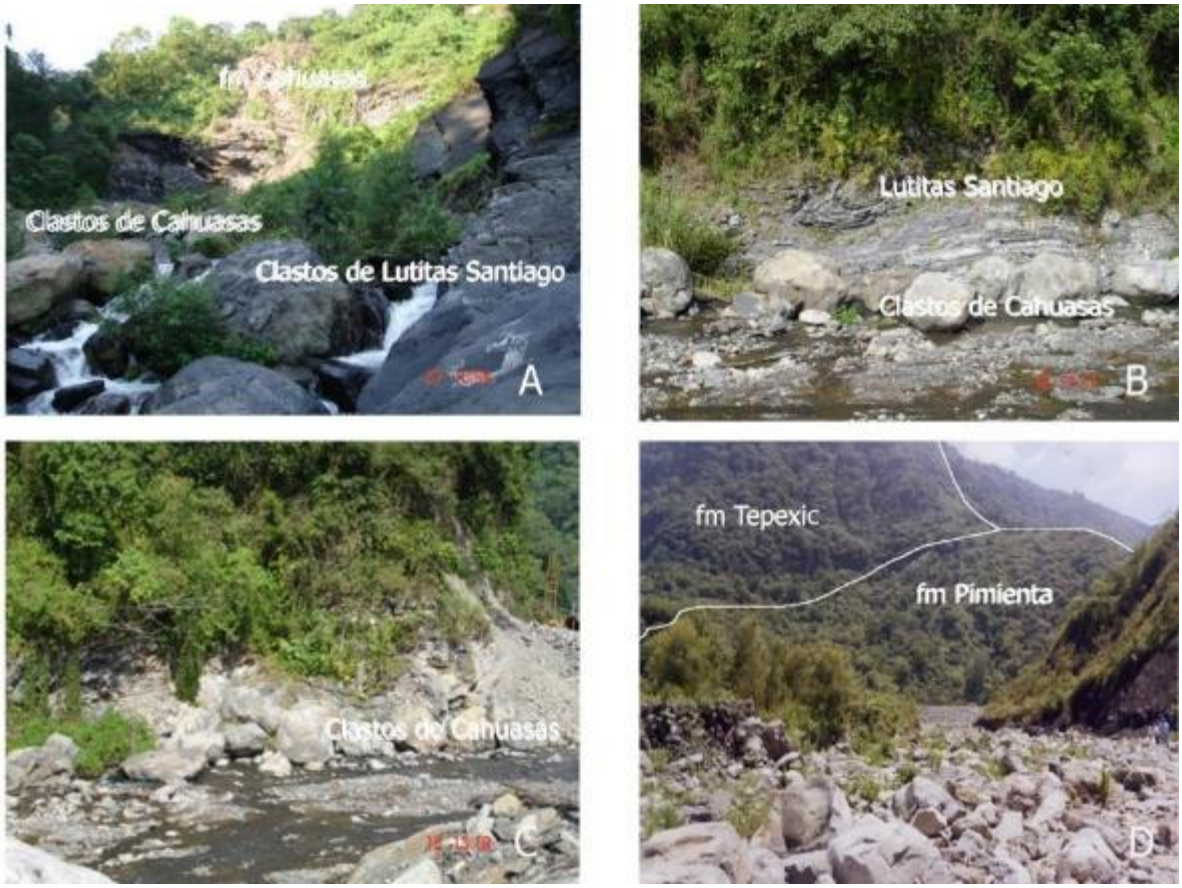

Figura 18. Afloramientos de areniscas de la formación Cahuasas (Jm), cerca de Xicotepec (foto A). Lutitas de la formación Santiago (Jm), sobreyaciendo a la fm. Cahuasas (fotos B, C). Afloramientos de la formación Tepexic (Jm), sobreyaciendo discordantemente sobre la formación Pimienta (Js), cerca de la C. H. Tepexic. Fotografía del autor, 2006.

✓ Calizas y lutitas (Cz – Lu)

A esta unidad geológica pertenecen las secuencias sedimentarias marinas de la formación Santiago y Tepexic. Las calizas son de textura microcristalina, de color gris obscuro a casi negro, y son calcarenitas y margas con alto contenido de materia orgánica y manganeso; la estratificación está poco marcada, alcanzando espesores de aproximadamente 30 a 50 cm. En tanto, las lutitas son negras a gris oscuro, muy fracturadas; con nódulos calcáreos gris oscuro e impregnaciones de calcopirita, así como manganeso. La unidad sobreyace a rocas del Jurásico medio y, en ocasiones, en la base de la unidad aparecen calizas conglomeráticas.

- ✓ Jurásico superior. Calizas y lutitas (cz-lu)

Figura 19. Lutita deleznable de la secuencia terrígena sedimentaria de la formación Santiago (Jm), en un afloramiento de la carretera al poblado de la Unión, Necaxa. Está formado por material mal clasificado y seleccionado de composición arcillosa-limosa. Los fragmentos superiores a 5cm son de material volcánico, incrustado en las últimas erupciones de la Mesa Central. Fotografía del autor, 2006.

A esta unidad geológica pertenece una secuencia sedimentaria marina de las formaciones Tamán y Pimienta, misma que agrupa una potente alternancia rítmica de capas pelítico-calcáreas, depositadas en un ambiente de mares profundos. Las calizas son de textura microcristalina, calcarenitas y margas, con alto contenido de materia orgánica y manganeso. En tanto, las lutitas son calcáreas, con impregnaciones de calcopirita y manganeso. La unidad sobreyace a rocas del Jurásico medio.

La primera formación, Tamán, se caracteriza por calizas negras de grano fino y calizas microcristalina, alternando con lutitas gris oscuro a negro, carbonosas y

calcáreas. Localmente presenta pequeñas inclusiones de terrígenos, lentes y capas de pedernal negro, así como bandas de concreciones. Por lo que corresponde a la formación Pimienta, en la parte superior, está constituida por calizas arcillosas de color pardo oscuro con intercalaciones de lutita y nódulos de pedernal negro; la parte inferior se compone de caliza negra arcillosa de estratificación delgada, alternando capas de lutita de color negro con capas de bentonita y pedernal negro. También se distingue por su relativa desarmonía, quedando de manifiesto su arcillosidad.

Figura 20. Plegamientos de lutitas de la formación Tamán (Js); corte de la carretera a la C. H. Patla. Fotografía del autor, 2006.

Figura 21. Afloramientos de calizas de la formación Pimienta (Js), interestratificadas con lutitas. Se observan pliegues de arrastre interiores a las capas y "boudinage" (foto D), característicos de deposición en cuencas poco estables. Afloramientos en las márgenes del río Necaxa, cerca de la C. H. Patla. Fotografía del autor, 2006.

Figura 22. Falla sobre calizas de la formación Pimienta (Js), interestratificadas con lutitas. Afloramientos en las márgenes del río Necaxa, cerca de la C. H. Patla. Fotografía del autor, 2006.

Figura 23. Depósitos de derrubios compuestos por bloques, gravas y arenas gruesas; todos de la formación Pimienta (Js); ladera del Cerro Mazacoatlán, a 15 Km de Necaxa. Fotografía del autor, 2006.

Figura 24. Afloramiento de lutitas de la formación Pimienta (Js) en la carretera a la C. H. Patla. Fotografía del autor, 2006.

- ✓ Cretácico inferior (Ki). Calizas (Cz)

Unidad sedimentaria formada en ambientes marinos someros de alta energía en la parte inferior, mientras que en la parte superior dominó un ambiente de deposición de plataforma interna – externa de baja energía. Compuesta por la formación Tamaulipas inferior, con calizas de grano fino y color crema grisáceo y crema amarillenta, en capas medianas y gruesas, estilolitas bien desarrolladas y paralelas a los planos de estratificación y nódulos irregulares con forma esferoidal de color castaño obscuro y gris claro. También se observan algunos cuerpos de calizas clásticas distribuidos en forma irregular. Esta unidad subyace concordantemente a la formación Otates y yace sobre la formación Pimienta.

Figura 25. Depósitos de derrubios calcáreos cerca de la presa Necaxa. Está compuesto por bloques, gravas gruesas, arenas gruesas; todos de la formación Tamaulipas inferior (Ksm). Fotografía del autor, 2006.

- ✓ Cretácico superior (Ksm). Calizas, margas areniscas y lutitas (Cz – Mg – Ar – Lu)

Esta unidad está formada por sedimentos de ambientes marinos de aguas medianas a profundas y mares en regresión, integrando las formaciones San Felipe, Méndez y Agua Nueva. La primera, presenta calizas arcillosas en estratos delgados a muy delgados, de color gris claro a verde, con frecuentes intercalaciones de lutita calcárea y lutita bentonítica, de colores verde y amarillo grisáceo. Por su parte, la formación Méndez está compuesta de lutita intercalada con limolita y caliza arcillosa de color gris claro, gris azuloso, gris verdoso, crema y ocre, de estratificación gruesa con foliación (lajeada), bandeamiento y laminación. Alternan algunas capas de caliza poco arcillosa de estratos delgados y horizontes de bentonitas de color verde, blanco y amarillo, así como capas de arenisca calcárea.

Por último, la formación Agua Nueva presenta calizas (mudstone-wackestone) de color gris oscuro y caliza ligeramente arcillosa, con pedernal negro en forma de nódulos y delgados lentes, intercalada con delgados horizontes arcillo-carbonosos laminares de color gris oscuro y algunos horizontes bentoníticos de color verdoso, principalmente. Hacia la cima decrece el contenido de pedernal, al tiempo que la lutita es más abundante.

- ✓ Terciario superior (Ts). (Mioceno-Pleistoceno)

Esta unidad está compuesta por un conjunto de rocas ígneas efusivas de carácter básico a ácidas, yaciendo discordantemente a las rocas mesozoicas y de la serie calcoalcalinas, por un probable tipo de vulcanismo bimodal. Al oriente de la cortina del vaso Necaxa afloran tobas ácidas, que ocupan amplias franjas al oeste y sur del territorio de estudio. Representan piroclastos de dacitas, riodacitas e ignimbritas, cuya composición mineralógica dominante son cuarzos, feldespatos, plagioclasas sódicas, biotitas, magnetitas, entre otras. Cubre discordantemente a rocas del Jurásico superior e inferior y del Cretácico inferior.

Los basaltos afloran al noreste del área de estudio como derrames horizontales en las partes altas al norte de la Central Hidroeléctrica Patla, sobreyaciendo a la formación Pimienta, mientras que los afloramientos al noroeste ocupan pequeñas manchas que cubren depresiones del terreno sobre la formación Cahuasas. Los basaltos de composición andesítica y brechas volcánicas tiene textura porfídica y estructura columnar, constituido principalmente por plagioclasas y olivino; mientras que las brechas volcánicas son de color gris oscuro y están conformadas por material escoráceo de basalto, con tamaños de ceniza y de brecha, incluyendo algunas bombas y fragmentos de pómez bien consolidados, que bordean conos cineríticos.

Figura 26. Derrames basálticos fragmentados de estructura columnar. Fotografía del autor, 2009.

Al centro del territorio aparecen extensos derrames horizontales compuestos de tobas andesíticas. La andesita es de color gris oscuro con puntos blancos, rojizos y gris rojizo, de textura afanítica a porfídica, con estructura compacta y masiva, caracterizada por su alto contenido de plagioclasas. La dacita está constituida por fenocristales de cuarzo, biotita y anfíboles, que cubren discordantemente los sedimentos mesozoicos del Jurásico y Cretácico.

En una posición altitudinal más alta que las tobas andesíticas, al centro y sur del área, afloran rocas riolíticas y dacíticas de color claro, tamaño de grano fino, textura afanítica y, en parte, porfídicas, compuestas en esencia por feldespato y cuarzo. Entre los minerales oscuros contenidos está presente una biotita de color castaño oscuro, todos ellos contenidos en una matriz vítrea a semivítrea.

Como parte de las laderas de edificios volcánicos más altos, al suroeste del territorio, afloran flujos piroclásticos y depósitos de caída, que se asociaron al emplazamiento y evolución del complejo riolítico Sierra Las Navajas, los cuales consisten principalmente en flujos de bloques de pómez, fragmentos de riolita cristalina y obsidiana, inmersos en una matriz de ceniza de grano fino, así como de tefras, conformadas por fragmentos de pómez bien clasificado y/o lapillis.

Figura 27. Contacto de los basaltos del Terciario sobreyaciendo a las calizas de la formación Pimienta (Js), en un corte de la carretera a la C. H. Patla. Se observan las evidencias de filtraciones de agua en los basaltos. Fotografía del autor, 2009.

III.3. Geología estructural.

De manera sintética, se puede afirmar que las estructuras geológicas dominantes consisten en una serie de pliegues cerrados asociados a cabalgaduras, y que los pliegues presentan con frecuencia flancos isoclinales hacia el SW; particularmente en las cercanías de las cabalgaduras, ya que los flancos inversos se

adelgazan y ocasionalmente se pierden. El eje de los pliegues tiene una tendencia general orientada NW-SE.

Las cabalgaduras presentan una orientación similar a la de los ejes de los pliegues. Son estructuras NW-SE de longitudes superiores a 50 km, lo que indica un despegue y corrimiento de al menos 15 kilómetros. Con frecuencia desarrolla estructuración foliada paralela a las superficies de corrimiento en franjas delgadas, paralelas a las cabalgaduras. Estas estructuras están armadas en rocas hasta del Cretácico superior, por lo que se interpreta que la edad de la deformación compresiva es de final del Cretácico e inicio de Paleoceno. Dado que las estructuras plicativas y las cabalgaduras se desarrollaron en las mismas condiciones y son paralelas, se asume su contemporaneidad.

El polígono de estudio está afectado por una tectónica compresiva y distensiva, asociada a las deformaciones laramídicas (compresión) y post laramídicos (tectónica distensiva), correspondientes al Cretácico tardío – Terciario temprano, formando el cinturón de pliegues y cabalgaduras de la Sierra Madre Oriental[163].

A causa de las diferencias litológicas y al espesor de las rocas involucradas[164],[165] resultan observables dos estilos estructurales de deformación. El área que corresponde al Anticlinorio de Huayacocotla, en el NW del polígono, se caracteriza por estructuras plicativas paralelas de plano axial subvertical y cabalgaduras, en menor grado. Ambas permitieron que las rocas cretácicas se deformaran como una unidad en pliegues de primer orden, por arreglo de rocas competentes con un espesor considerable, desarrollando pliegues disarmónicos de segundo orden, abiertos y cerrados.

[163] Suter, M. 1997
[164] Suter, M. *Ibidem*. 1997
[165] Eguiluz et al., 2000

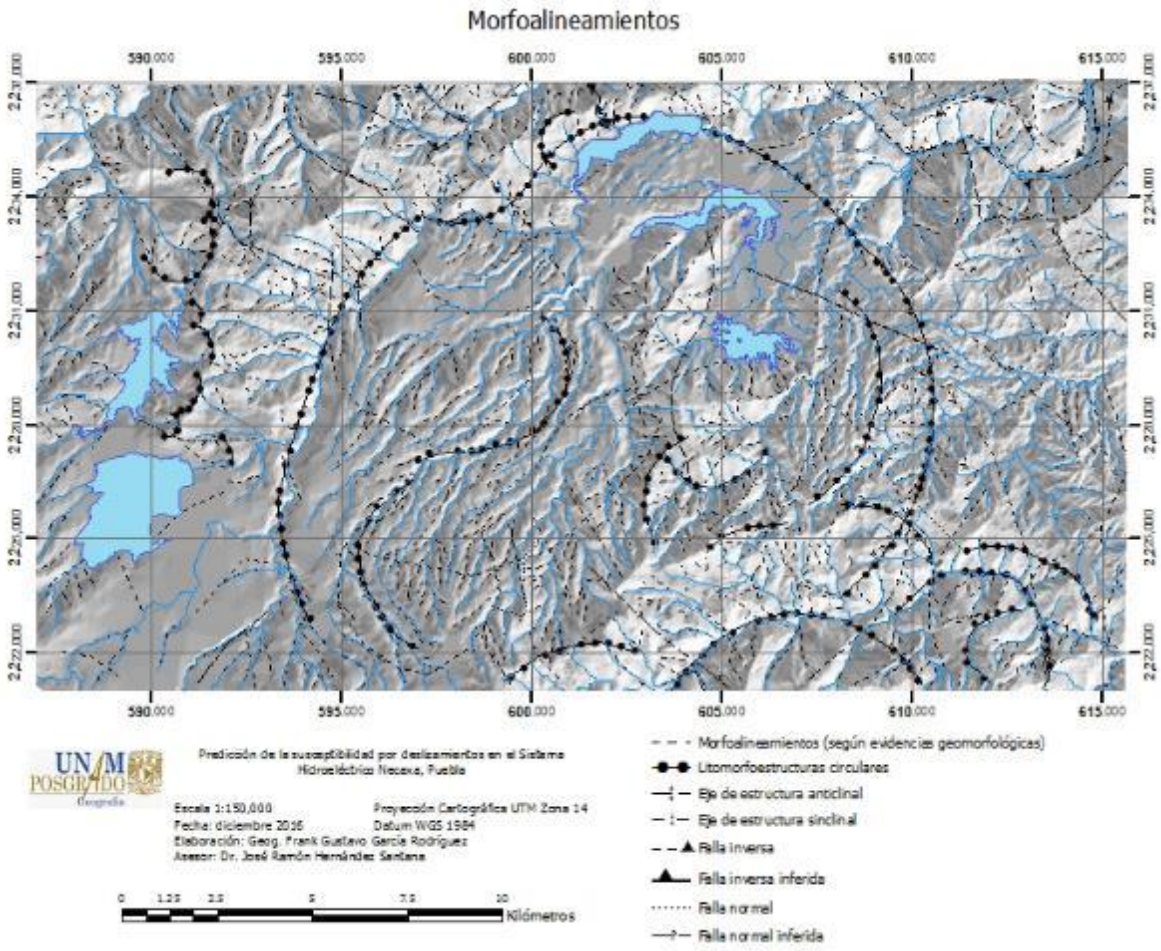

Figura 28. Mapa de morfoalineamientos.

Los pliegues tienen una tendencia NW – SE, algunos recostados hacia el E – NE y, en ocasiones, con planos de despliegue o pliegues fallas con pequeños desplazamientos. El estilo de deformación es menos intenso en esta parte de la Sierra Madre Oriental, con menos estructuras cabalgantes y pliegues menos cerrados, conformando una cubierta tipo *thin skined*. La dirección de los esfuerzos es al NE, desarrollada durante la orogenia larámidica y subyacente a potentes campos volcánicos de edad pliocuaternaria. Al nororiente del Anticlinorio Huayacocotla se localiza el sinclinal San Pablo, orientado al NW – SE, con el mismo estilo estructural que el anterior.

Figura 29. Frente sur de la falla inversa (cabalgadura) Patla. La cabalgadura se localiza en la margen norte del río Necaxa. Fotografía del autor, 2009.

Las estructuras del dominio dúctil-frágil están representadas por una serie de napas de poco desarrollo y transporte tectónico, como la falla inversa de Xolotla, al occidente del polígono, con rumbo preferencial de NW 35° SE, donde se superponen rocas del Jurásico a las del Cretácico. Similar a la anterior, se localiza la falla inversa inferida, denominada Cabalgadura Patla, al nororiente del polígono y rumbo preferencial de NW 34° SE. Las estructuras de dominio frágil predominan como fallas normales al centro y occidente del polígono.

Al sur de la presa Necaxa, se localiza un sinclinal denominado Ixtepetl, que presenta dos orientaciones, una al NW 15º SE y luego cambia al NE 10 º SW. Al parecer, la inflexión indica una deformación post-cretácica. El anticlinal Xaltepec es una estructura subparalela a la anterior, formada por rocas cretácicas y un eje NW 10º a 12º SE, adoptando una flexión de orientación NE-SW en la parte central de la

estructura. Este tipo de deformación se observa en las unidades sedimentarias del polígono como producto de los procesos tectónicos, ocurridos durante la orogenia Laramide.

La cabalgadura Osamatepetl, localizada al noreste de Huauchinango, en las inmediaciones del poblado Tlalcoyunga tiene una orientación general NW 30º SE y buzamiento de 25º al SW, que se flexiona al cambiar de dirección hasta adoptar una forma irregular. Las rocas cretácicas cabalgan a las del Jurásico medio, con planos de despegue e indicadores cinemáticas como estrías y sigmoides en pequeñas áreas de contacto.

Al noroeste de la ciudad de Huauchinango, la cabalgadura Nopala, en las inmediaciones del poblado del mismo nombre, tiene una orientación general NW 30º SE y coloca en contacto tectónico a rocas del Jurásico medio con las del Cretácico superior. Otras cabalgaduras, como Matlaluca y El Ídolo, se localizan paralelas a Nopala con las mismas características de contacto tectónico.

Entre las diversas fallas de dominio frágil, se encuentran la falla Mamiquetla, con orientación general NW 30º SE y contacto Jurásico medio – Cretácico superior. La falla normal La Constancia II, localizada al sureste del poblado de Chachahuantla, tiene rumbo general de NW 39º SE, y en su parte central corta perpendicularmente a la falla Constancia I, que se orienta al NW 5º SE.

III.4. Climas.

Para el tratamiento de los datos climatológicos, se realizó un conjunto de procedimientos, mismo que se describe a continuación. Los datos se obtuvieron de

las variables climatológicas diarias y mensuales, provenientes de la Base de Datos Climatológica Nacional (Sistema CLICOM)[166].

Se transformaron las coordenadas que poseen las estaciones climatológicas, ubicándose en un mapa de la República Mexicana. Al polígono se le realizó un análisis de cercanía en ArcGIS, a una distancia de 45 km, interceptando las estaciones climatológicas con el área obtenida del análisis espacial. El resultado de esta intercepción arrojó 128 estaciones. Sin embargo, no todas cumplieron con los requisitos para el análisis climatológico: contar, al menos, con 20 años continuos de registros y más del 70 % de integridad de los datos.4896

Las estaciones que cumplen con estos requisitos son las siguientes:

No	IdEst	Nombre	Altitud	Inicio	Fin	Años	%
1	13002	Apan, Apan (DGE)	2,496	1954-10	2000-08	45.90	99.1
2	13006	Ciudad Sahagún	2,000	1961-01	2000-12	40.00	95.2
3	13009	Epazoyucan, Epazoyucan	2,300	1966-01	1989-07	23.60	94.3
4	13027	San Jerónimo, Tepeapulco	1,528	1970-11	2000-12	30.20	99
5	13028	San Miguel Allende,	1,528	1961-01	1988-11	27.90	95.3
6	13029	San Lorenzo Zayula	1,528	1961-01	2000-12	40.00	92.7
7	13030	San Rafael Mazatepec	2,370	1966-01	2000-04	34.30	86.2
8	13031	Santiago Tulantepec	2,000	1966-05	2000-12	34.70	87.2
9	13033	Singuilucan, Singuilucan	2,714	1961-01	2000-12	40.00	86.8
10	13034	Tenango de Doria (SMN)	1,550	1941-12	2003-12	62.10	88.7
11	13037	Tlanalapan, Tlanalapan	2,270	1961-01	1988-12	28.00	98.3
12	13046	Laguna de Apan, Apan	2,500	1968-09	1988-12	20.30	92.2
13	13061	Alcholoya, Acatlan	2,060	1969-04	2003-12	34.70	86
14	13082	Presa La Esperanza	2,210	1973-01	2003-12	31.00	100
15	13085	Presa Tezoyo, Almoloya	2,590	1973-01	2003-12	31.00	100
16	13095	Agua Blanca, Agua Blanca	2,100	1974-01	2003-11	29.90	90.5
17	13098	Huasca, Huasca	1,600	1969-05	2003-12	34.70	86
18	13099	Metepec, Metepec	2,120	1974-08	2002-11	28.30	98.7
19	13100	Omitlan, Omitlan	2,370	1974-04	2003-12	29.70	92.3
20	13116	El Sembo, Huasca Ocampo	1,800	1980-05	2003-12	23.70	95.2
21	13127	El Aserradero, Cuautepec	2,000	1981-01	2003-12	23.00	79.4
22	21006	Ahuacatlán, Ahuacatlán	2,160	1944-08	1972-10	28.20	86.3
23	21008	Aquixtla, Aquixtla (CFE)	2,310	1961-03	2005-09	44.60	87
24	21021	Capuluaque,Tetela de O.	2,200	1954-11	2005-09	50.90	90
25	21029	Colonia Temextla, Cuyuaco	2,310	1966-03	2002-11	36.70	96.9
26	21037	El Paredón, Chignahuapan	1,700	1966-05	1988-12	22.70	98.4

[166] Datos climáticos diarios del CLICOM del SMN con gráficas del CICESE (http://clicom-mex.cicese.mx)

No	IdEst	Nombre	Altitud	Inicio	Fin	Años	%
27	21043	Huahuaxtla, Xochitan	1,625	1954-08	2005-09	51.20	88.9
28	21047	Ixtacamaxtitlan, (CFE)	2,175	1954-11	2005-09	50.90	88.6
29	21055	La Pagoda, (CFE)	2,235	1960-01	1997-04	37.30	98.5
30	21059	Oyameles, Tlatlauquitepec	2,850	1961-01	2001-12	41.00	92.7
31	21064	Presa La Soledad, (CFE)	816	1962-09	2005-09	43.10	86.3
32	21066	Pueblo Nvo.,Chignahuapan	2,700	1961-03	1989-12	28.80	99.4
33	21069	S. Antonio Arroyo Prieto	3,140	1952-12	2005-09	52.80	81.5
34	21098	Tlatlauquitepec, (CFE)	2,025	1953-06	1990-12	37.60	96.2
35	21103	Zacapoaxtla, Zacapoaxtla	2,045	1944-07	2001-12	57.50	91
36	21107	Zacatlán, Zacatlán	2,059	1955-12	1995-04	39.40	94.1
37	21108	Zapotitlán de Méndez, (SMN)	590	1961-01	1991-10	30.80	96.8
38	21111	Santiago Zautla, Zautla	1,940	1954-10	2005-09	51.00	86.6
39	21118	Huauchinango, (SMN)	1,472	1921-12	2001-11	80.00	84.3
40	21126	Loma Alta, Chignahuapan	2,350	1961-03	2005-09	44.60	86.5
41	21127	Xicotepec de Juarez, (SMN)	1,155	1942-11	2001-11	59.10	95.8
42	21129	Francisco I. Madero, DGE	2,650	1969-02	2001-10	32.70	88.2
43	29002	Apizaco, Apizaco	2,408	1928-01	2005-04	77.30	85.1
44	29003	Atlanga San José	2,498	1961-01	2004-10	43.80	99.5
45	29004	Cuamancingo, Domingo A.	2,498	1969-01	2003-12	35.00	84.4
46	29005	Cuapiaxtla, Cuapiaxtla	2,483	1962-08	2004-10	42.20	79.4
47	29011	Huamantla, Huamantla	2,553	1942-10	2004-10	62.10	93.9
48	29012	La Gloria, Tlaxco (CFE)	2,850	1961-10	1996-06	34.80	92.8
49	29015	Mazapa, Calpulalpan	2,714	1936-05	1983-07	47.20	99.6
50	29017	Nanacamilpa (SMN)	2,734	1949-10	1988-12	39.20	78.6
51	29023	San Cristóbal	2,532	1961-01	1989-02	28.20	99.7
52	29024	Sanctorum, L. Cárdenas	2,183	1966-07	2003-12	37.50	79.5
53	29025	San Marcos, Calpulalpan	2,590	1966-08	2002-01	35.50	92.7
54	29027	Tocatlan, Tocatlan	2,460	1966-02	2005-05	39.30	90.5
55	29032	Tlaxco, Tlaxco	2,240	1943-12	2005-05	61.50	94.2
56	29034	Zoquiapan, Calpulalpan	2,450	1966-04	2000-08	34.40	94.3
57	29035	Calpulalpan, Calpulalpan	2,578	1943-12	2004-10	60.90	82.9
58	29051	Toluca de Gpe, Terrenate	2,505	1979-08	2002-01	22.50	90.1
59	29052	El Rosario, Tlaxco	2,340	1981-01	2001-12	21.00	89.7
60	30034	Coyutla, Coyutla	245	1961-05	2004-09	43.40	97.5
61	30067	Huayacocotla	2,100	1961-11	2001-01	39.30	72.4
62	30072	Ixhuatlan del Café	306	1945-07	2003-12	58.50	96.1
63	30106	Melchor Ocampo, Espinal	200	1961-05	1997-04	36.00	98.8
64	30134	Progreso de Zaragoza	260	1961-01	2002-12	42.00	94.9
65	30154	Santa Ana, Chumatlan (CFE)	210	1964-12	1997-05	32.50	88.4
66	30173	Tecuantepepc, Zozocolco	250	1961-01	2004-09	43.70	94.1

Tabla 3. Relación de las estaciones climatológicas analizadas.

Una vez obtenidos estos resultados, se realizó la extracción de los datos referentes a las precipitaciones y las temperaturas para hacerlos accesibles a los procedimientos estadísticos que se aplicaron.

Antes de iniciar el análisis climatológico, se verificó la continuidad y la consistencia de los datos. Cabe señalar, que dicha continuidad puede alterarse debido a daños en el equipo recolector de datos, falta de recolección de los registros, etc. También se corroboró la consistencia de los registros, verificando que pertenecieran a la misma población estadística.

Para estimar los datos faltantes y verificar su consistencia, se usaron dos pruebas: la *precipitación normal*, como estándar, y el método de la *curva de doble masa.*

- ✓ Estimación de datos faltantes

Los registros faltantes se estimaron utilizando la *precipitación normal* como estándar de comparación. Esta precipitación se obtuvo de la página Web del Servicio Meteorológico Nacional, donde están publicadas y representan la continuidad de al menos 30 años de registros (1950 – 1980).

Basado en la precipitación, el método de correlación estima los datos faltantes mediante el siguiente enunciado: si se escoge *M* estaciones cercanas al punto donde faltan los datos, con precipitaciones anuales $P_1, P_2, P_3, \ldots P_m$, y de cada estación se conoce la precipitación normal $\boldsymbol{N}$, entonces se puede encontrar la precipitación $\boldsymbol{P_x}$ en una estación vecina a las anteriores, de la siguiente manera:

$$P_x = N_x / M \left[P_1 / N_1 + P_2 / N_2 + P_3 / N_3 + \ldots\ldots P_m / N_m \right] \qquad \text{Ecuación No. 6}$$

- ✓ Consistencia de los registros

Entre las causas más comunes por inconsistencia en los registros, se encuentran el traslado de la estación a un nuevo sitio, los incendios forestales, los deslizamientos

de tierras, las inundaciones o eventos catastróficos, etc. En este caso, el análisis utilizado para detectar la inconsistencia de los datos fue el llamado *curva de doble masa.* El método se basa en lo siguiente: si se escogen *N* estaciones vecinas a la estación *X* que se analiza, el registro de la precipitación media acumulada de las estaciones vecinas debe tener una pendiente sin rupturas. Si se observa un cambio de pendiente, indica un cambio en el régimen de la estación *X*. Los valores de la estación *X*, a partir del cambio, se corrigen usando la relación:

$$P_{cx} = P_x * M_c / M_a \qquad \text{Ecuación No. 7}$$

donde:

P_{cx} es la precipitación corregida en cualquier tiempo t1 en la estación X,

P_x el registro original de la estación X en el tiempo t1,

M_c la pendiente corregida de la curva de doble masa, y

M_a la pendiente original de la curva de doble masa.

III.5. Tipos climáticos.

El clima en la región de estudio está determinado por la posición latitudinal, la situación geográfica y la cercanía al Golfo de México, por lo cual la cantidad de precipitaciones y el régimen de humedad atmosférico están asociados a la distribución regional del relieve. Aunado a lo anterior, a finales del verano y principios de la temporada de otoño, la región es azotada intensamente por los ciclones tropicales y otros eventos extremos, provenientes del Caribe, que incrementan el aporte de humedad a la zona. En invierno, las masas de aire polar, provenientes del Golfo de México y cargadas de humedad, contribuyen al incremento de precipitaciones.

De acuerdo a la clasificación climática de Köppen, modificada por Enriqueta García, en el territorio dominan tres tipos de climáticos bastante similares:

- ✓ (A)Cbm(f)(i')w"

Clima semicálido húmedo del grupo C. El régimen de temperatura media anual es mayor de 18°C, la temperatura del mes más frio es menor de 18°C y la temperatura del mes más caliente es mayor de 22°C. La precipitación del mes más seco es mayor a 40 mm; las lluvias ocurren todo el año con sequia intraestival y el porcentaje de lluvia invernal es menor al 18% del total anual (1,565.80 mm).

Los siguientes diagramas de la estación Ahuacatlán son representativos del tipo climático anterior. Como se puede observar, el inicio del período de lluvias es a mediados de mayo y concluye a finales de la temporada ciclónica, en noviembre.

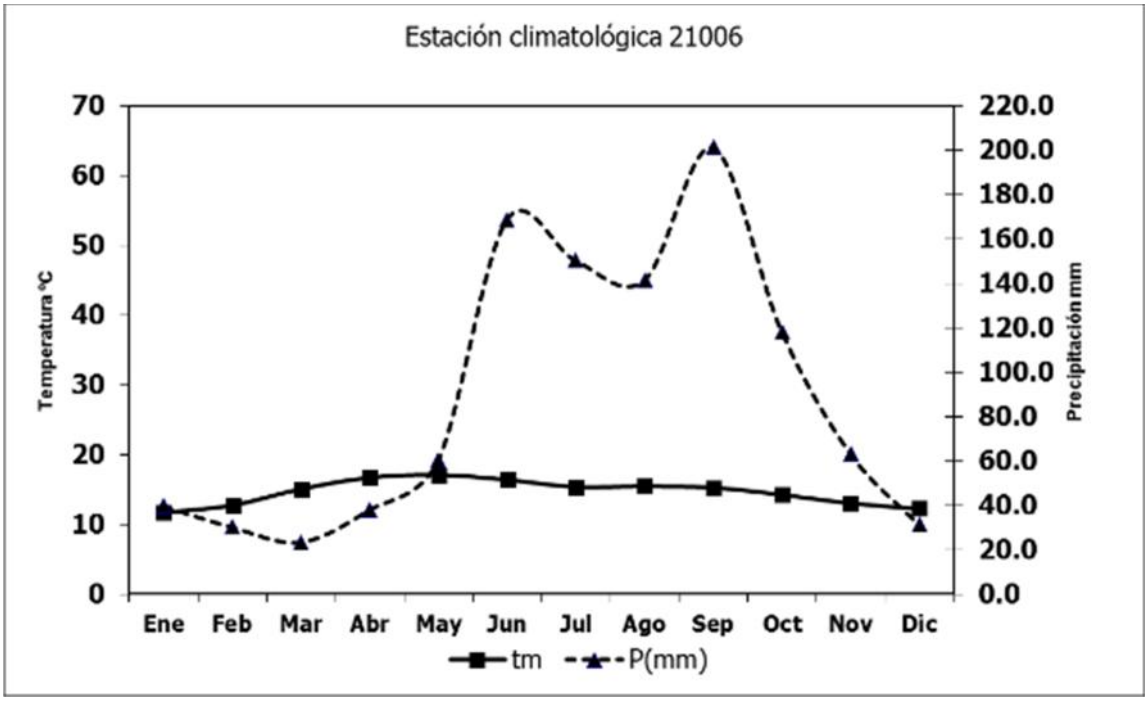

Figura 29. Diagrama ombrotérmico representativo del tipo climático (A)Cbm(f)(i') w" en la estación climatológica 21006 Ahuacatlán, Puebla.

Dada la importancia del agua en el suelo para la ocurrencia de deslizamientos, se realizaron los cálculos teóricos para ejemplificar, en cada tipo climático, el balance

hídrico del suelo durante cada mes en el año hidrológico. La evapotranspiración potencial, ETP, y la evapotranspiración real, ETR, se calcularon mediante los métodos de Thornthwaite, 1948 y Thornthwaite & Mather, 1955, respectivamente[167].

Con un valor teórico de reserva máxima de agua 6.6 mm, la tabla y el gráfico correspondientes a la estación climatológica 21006 Ahuacatlán, muestran que de mayo a noviembre la precipitación es mayor que la suma de la evapotranspiración real (ETR) y la potencial (ETP); por tanto, se puede asumir que el exceso de agua inicialmente se acumula en el suelo (mayo a julio) y acaba por incorporarse a la escorrentía que sale a la superficie (escorrentía hipodérmica). En los meses de diciembre a enero, aunque la precipitación es menor que la ETP, no se produce déficit de agua, porque la vegetación utiliza el agua acumulada, mientras que el déficit se prolonga de enero a mayo.

	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	TOTAL
PP	336.60	169.70	81.80	37.20	36.40	25.70	31.00	59.60	74.50	219.60	265.00	228.70	1,565.80
ETP	83.00	69.43	54.37	43.83	43.13	47.66	69.69	81.07	94.53	94.89	89.45	90.17	861.21
ETR	83.00	69.43	54.37	43.80	36.40	25.70	31.00	59.60	74.50	94.89	89.45	90.17	752.30
DÉFICIT	0.00	0.00	0.00	0.03	6.73	21.96	38.69	21.47	20.03	0.00	0.00	0.00	108.91
RESERVA	6.60	6.60	6.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.60	6.60	6.60	
EXCEDENTES	247.00	100.27	27.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	118.11	175.55	138.53	806.90

Tabla 4. Déficit de agua en el suelo para la estación climatológica 21006 Ahuacatlán, Puebla.

Para comprobar el modelo, de la tabla anterior se obtiene:

$$\sum \text{Precipitaciones} = \sum \text{ETR} + \sum \text{Excedentes} \qquad \text{Ecuación 8}$$

$$\sum \text{ETP} - \sum \text{ETR} = \sum \text{Déficits} \qquad \text{Ecuación 9}$$

[167] Thornthwaite, C. W. "An Approach toward a Rational Classification of Climate." *Geographical Review* 38, (1948): 55-94.

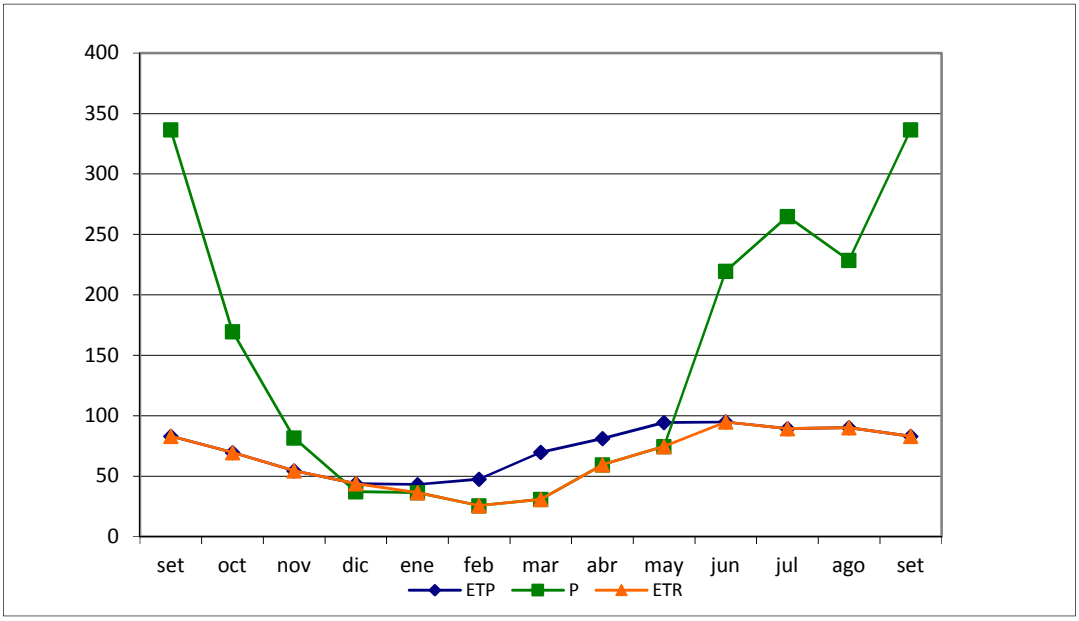

Figura 30. Balance hídrico del suelo, Estación 21006.

- ✓ Cb(fm)(e)g

Clima templado húmedo con lluvias todo el año, verano fresco y largo; la precipitación del mes más seco es mayor de 40 mm y menor del 18% de la lluvia invernal, con respecto a la lluvia total (1,951.90 mm), extremo, con el mes más caliente antes de junio. Una estación climatológica representativa es la estación Huauchinango. Como se advierte en el gráfico siguiente, el período de lluvias inicia en mayo y concluye en noviembre.

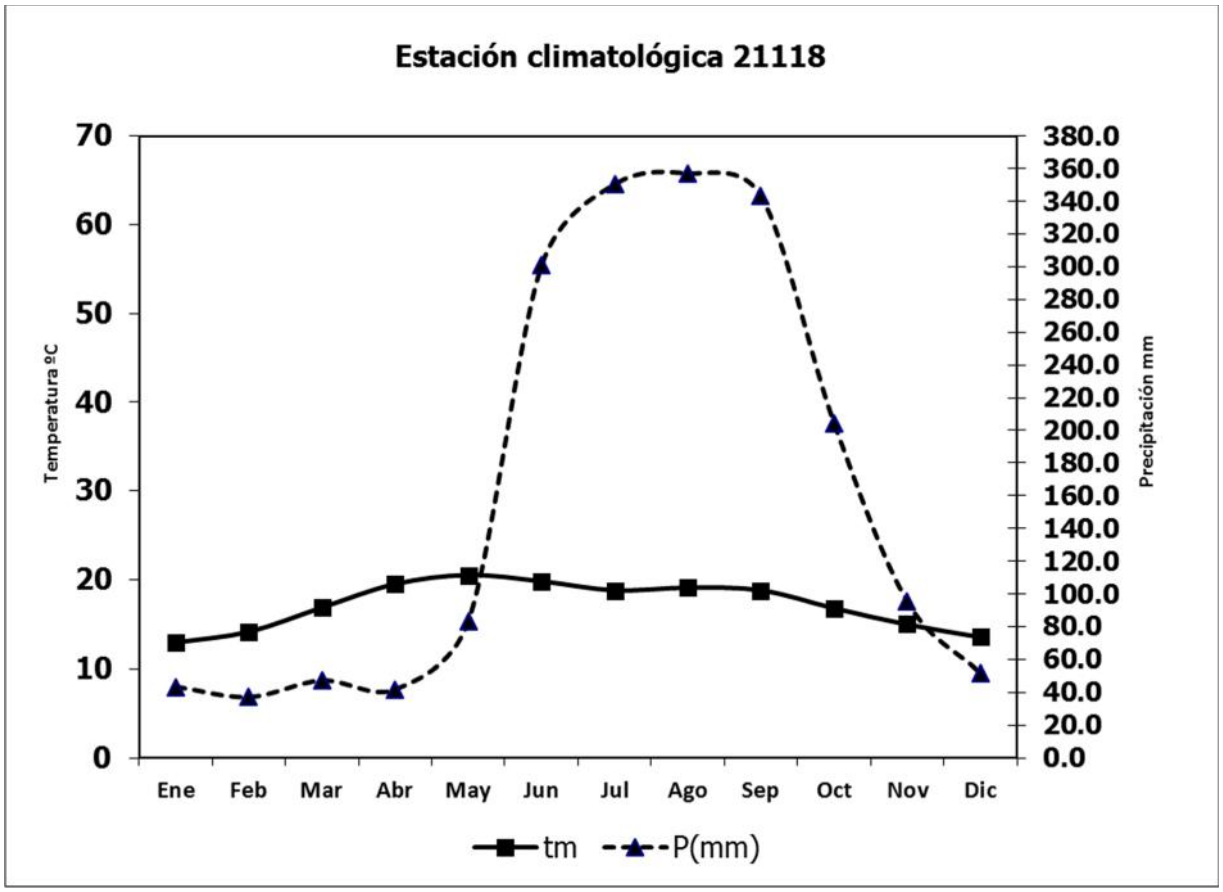

Figura 31. Diagrama ombrotérmico representativo del tipo climático Cb (fm)(e)g en la estación climatológica 21118 Huauchinango, Puebla.

	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	TOTAL
PP	343.10	203.00	94.10	51.50	43.40	37.10	47.20	41.20	82.40	300.50	351.40	357.00	1,951.90
ETP	76.94	62.52	47.73	40.70	37.98	41.70	64.74	84.03	98.20	91.07	85.31	85.12	816.02
ETR	76.94	62.52	47.73	40.70	37.98	37.90	47.20	41.20	82.40	91.07	85.31	85.12	736.06
DÉFICIT	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.80	17.54	42.83	15.80	0.00	0.00	0.00	79.96
RESERVA	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.80	0.80	0.80	
EXCEDENTES	265.36	140.48	46.37	10.80	5.42	0.00	0.00	0.00	0.00	208.63	266.09	271.88	1,215.04

Tabla 5. Déficit de agua en el suelo para la estación climatológica 21118 Huauchinango, Puebla.

Con una reserva de 0.8 mm y un comportamiento similar a la anterior gráfica de balance hídrico del suelo, la diferencia fundamental estriba en que el período de déficit de agua en el suelo es menor; iniciando en febrero y concluyendo en mayo.

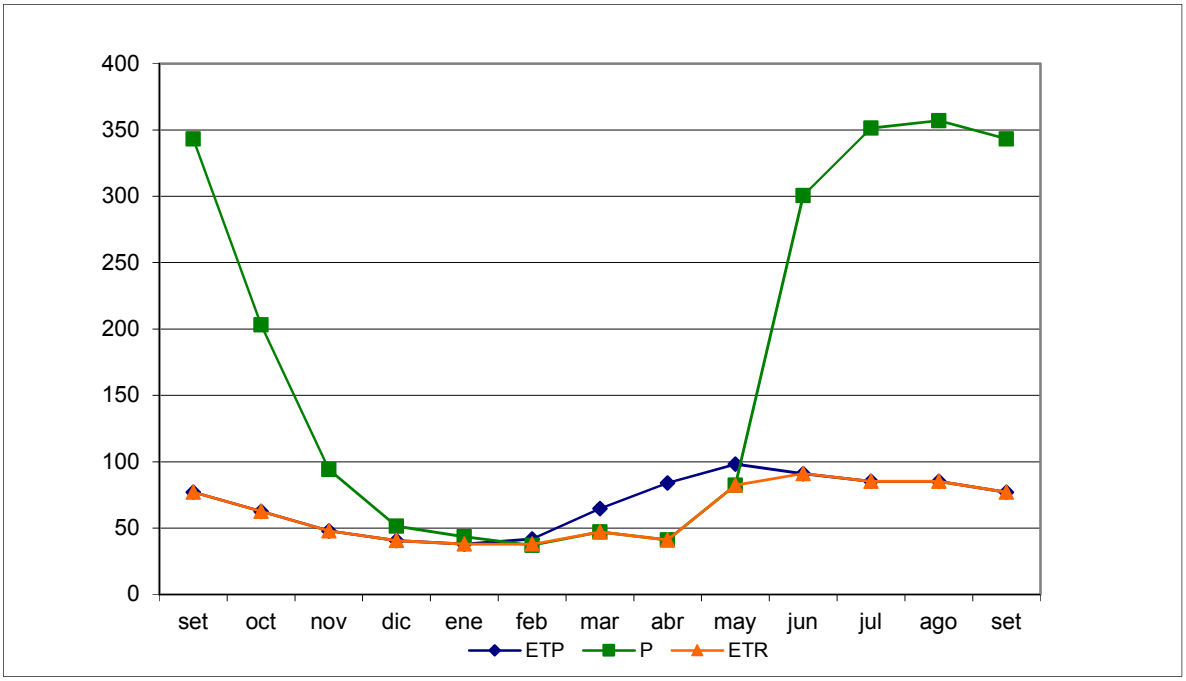

Figura 32. Balance hídrico del suelo, Estación 21118.

- ✓ Cbm (f)(e) gw

Clima templado y húmedo, con lluvias todo el año; verano fresco y largo, con precipitación del mes más seco mayor de 40 mm y más del 18% de lluvia invernal con respecto a la lluvia total (1,067.40 mm). Extremoso, con el mes más cálido antes de junio (marcha de la temperatura tipo Ganges) y sequía intraestival. La estación climatológica representativa utilizada es Zacatlán, Puebla.

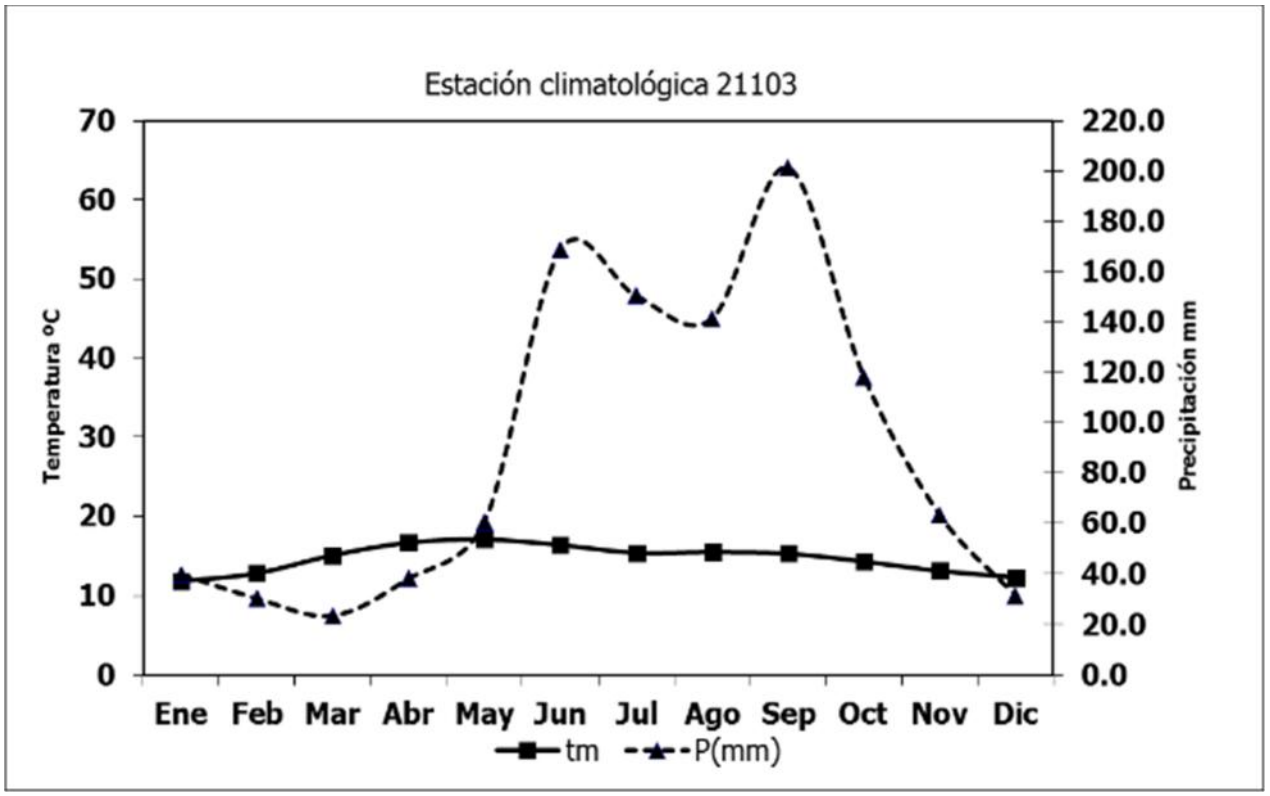

Figura 33. Diagrama ombrotérmico representativo del tipo climático Cbm (f)(e) gw en la estación climatológica 21103 Zacatlán, Puebla.

	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	TOTAL
PP	201.40	118.30	63.30	31.20	39.80	30.30	23.50	38.10	60.50	168.90	150.50	141.60	1,067.40
ETP	63.08	56.53	46.29	42.74	40.62	43.03	62.72	73.43	81.40	75.47	70.61	69.18	725.09
ETR	63.08	56.53	46.29	31.60	39.80	30.30	23.50	38.10	60.50	75.47	70.61	69.18	604.96
DÉFICIT	0.00	0.00	0.00	11.14	0.82	12.73	39.22	35.33	20.90	0.00	0.00	0.00	120.13
RESERVA	0.40	0.40	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.40	0.40	0.40	
EXCEDENTES	137.92	61.77	17.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	93.03	79.89	72.42	462.04

Tabla 6. Déficit de agua en el suelo para la estación climatológica 21103 Zacatlán, Puebla.

Similar al gráfico de Ahuacatlán, el comportamiento del balance del agua en el suelo difiere en el tiempo del uso de la reserva de la misma, pues es más corto de

mediados de diciembre a mediados de enero, concluyendo el déficit a mediados de mayo.

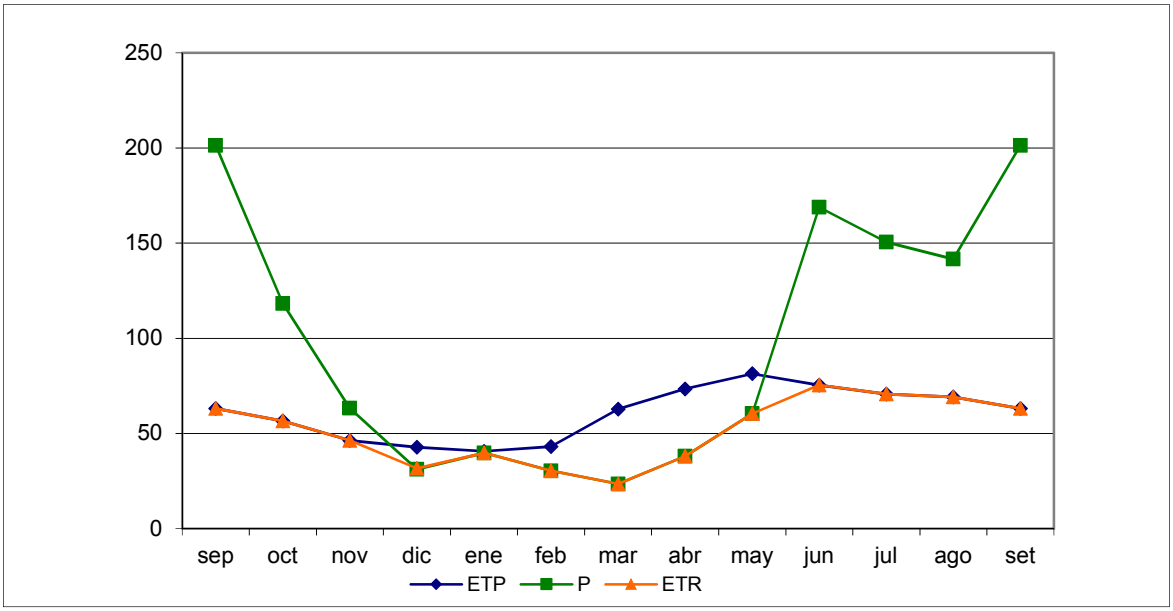

FIGURA 34. BALANCE HÍDRICO DEL SUELO, ESTACIÓN 21103.

III.6. Edafología.

Para la descripción de la edafología del territorio, se analizaron diferentes fuentes bibliográficas y cartográficas, como el levantamiento edafológico del INEGI de 1982, a escala 1: 250,000, y que utiliza la clasificación de suelos establecida por la FAO/UNESCO/ISRIC (1988).

De acuerdo a la posición en el relieve y el tipo de clima, los suelos se agruparon de la siguiente manera:

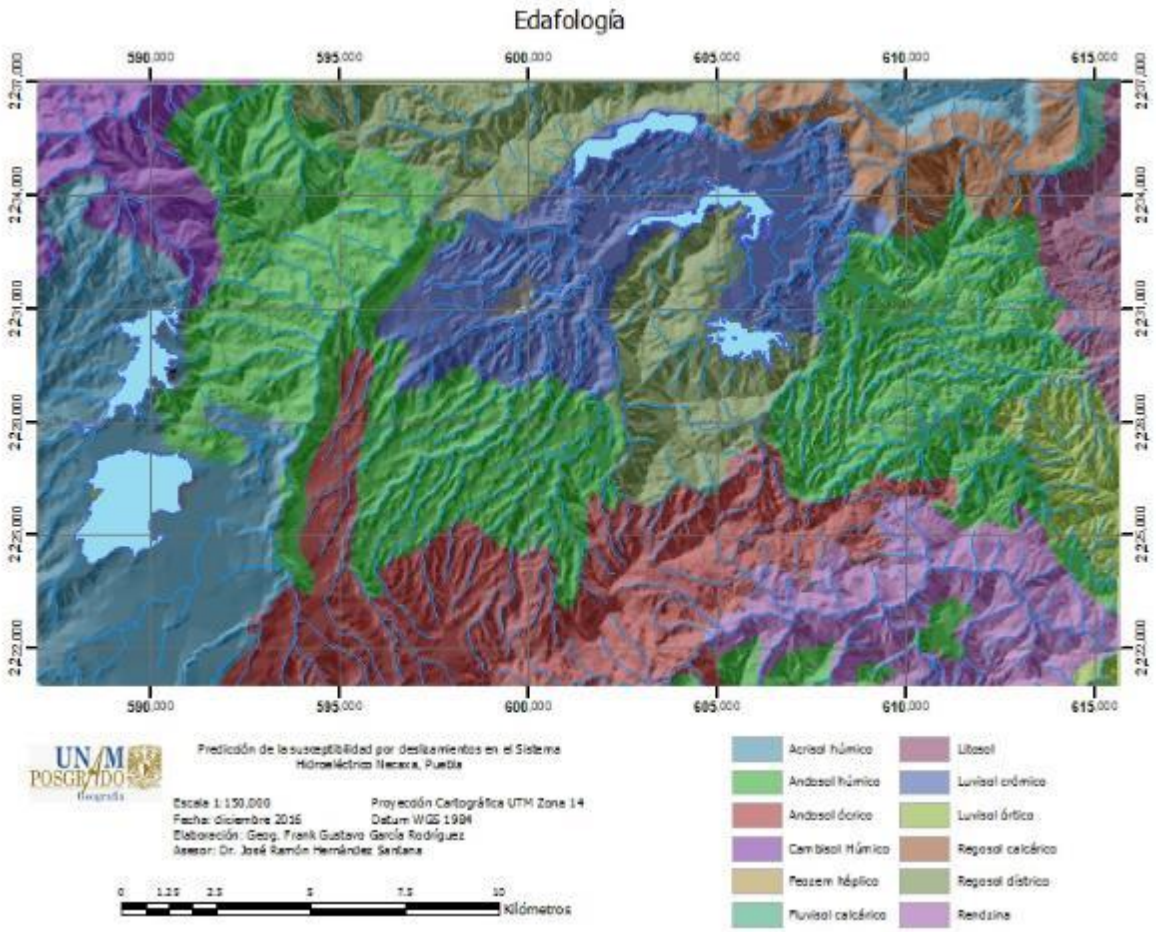

Figura 35. Mapa edafológico.

- ✓ Suelos de áreas montañosas con climas templados

Andosol (Th)

El clima y el relieve son los agentes pedogenéticos más importantes en el área de estudio. Las zonas templadas de sierras y serranías de la parte sur y poniente están formadas por andosoles y, en menor proporción, por litosoles con vegetación de bosque de coníferas.

La formación del Andosol es resultado del aporte de material volcánico, de colores oscuros y una estructura angular o subangular. El contenido de arcilla es bajo o muy bajo, inferior a los 20 - 25%, dadas su esponjosidad y porosidad, y

atribuidas a la presencia de alófanos, que incrementan la capacidad de retención del agua. Son suelos ácidos con valores de pH de 4.5 en la superficie y un incremento constante con la profundidad, hasta llegar a valores iguales o superiores a 6.0 en las capas de ceniza relativamente inalteradas.

Litosoles (I)

Los litosoles son suelos jóvenes con características similares a la roca madre: delgados, pedregosos y con poca cantidad de materia orgánica, característicos de laderas con fuerte inclinación y relieves abruptos.

Figura 36. Depósitos eluviales de color rojo, compuestos de cenizas volcánicas grises y rojas en una matriz limo-arenosas, cementados con arcillas rojas. Soporta una comunidad vegetal de *Pinus sp*. Estación para el "malacate" a la C. H. Tepexic. Fotografía del autor, 2006.

Regosoles

Estos suelos proceden de materiales no consolidados, regolitos en general, excluyendo a los depósitos aluviales recientes. Se caracterizan por la ausencia de

horizontes diagnóstico y poseen colores claros. Aparecen asociados a litosoles o rocas desnudas con un contenido arcilloso bajo, pero alto en materias orgánicas.

- ✓ Suelos de lomeríos en climas húmedos

Acrisol húmico (Ah)

Poseen un horizonte A úmbrico y un contenido elevado de materia orgánica. El horizonte superior mineral es de color pardo/grisáceo oscuro, lixiviados con textura de migajón arenoso y espesores variables entre 10 y 30 cm. Su formación está vinculada a rocas volcánicas ácidas de finales del Terciario, que pueden evolucionar a partir de suelos existentes. Su localización está vinculada con relieves estables, planos a ligeramente ondulados, donde el agua pueda circular libremente en sus horizontes.

Luvisoles (L)

Se caracterizan por la presencia de horizonte A lixiviado que origina el horizonte B, arcilloso. Generalmente la capacidad de intercambio catiónico tiene dos máximos: uno asociado con el elevado contenido de materia orgánica de la superficie, y el segundo, que se registra en el horizonte medio, donde también el contenido de arcilla llega a su máximo. Los materiales parentales son depósitos no consolidados de textura media a fina, de origen carbonatados.

Rendzinas

La característica física más importante de este tipo de suelo es su escasa profundidad, con textura de media a fina y estructura granular a bloques pequeños subangulares, y pH superior a 8.0. Los contenidos de materia orgánica se encuentran entre 5% a 15% y un avanzado estado de humificación. El material parental es variado en litología, porque se compone de depósitos de acarreos no consolidados.

- ✓ Suelos de llanuras y lomeríos en climas medianamente húmedos

Cambisols (Be)

Son suelos con colores pardos, textura media y alto contenido de arcilla en el horizonte superior, que disminuye con la profundidad. Los materiales maternos usuales en estos suelos son depósitos no consolidados de textura limosa y de migajón. Se desarrollan en sitios planos estables o de pendiente suave.

Feozems (H)

Su principal característica es una capa superficial obscura, suave y rica en materia orgánica y nutrientes. El horizonte mineral superior es un horizonte A mólico de color gris muy oscuro, de hasta 50 cm de espesor. La cantidad máxima de arcilla ocurre en el horizonte medio con valores del 30% al 40%. El pH varía de ligeramente de alcalino a ligeramente ácido, con una estructura de bloques angulares a subangulares. Los Feozems se desarrollan en condiciones aeróbicas, donde hay movimiento libre de agua a través del suelo.

Fluvisoles (Jc)

Suelos formados por la acumulación materiales transportados por el agua y constituidos por materiales disgregados; por esto su falta de textura definida. Están asociados a la intensidad de los procesos erosivos acumulativos de origen fluvial. De su anterior factor depende el grado de desarrollo y la profundidad del perfil. Son característicos de las llanuras de inundación.

Vertisoles

Son suelos arcillosos de color café rojizo, que se caracterizan por las grietas anchas y profundas que presentan en época de sequía. Tienen textura uniforme fina o muy fina y bajo contenido de materia orgánica; quizá su propiedad más importante es la dominación de arcilla, por lo general motmorillonita, que ocasiona que al secarse se encojan y agrieten. Se desarrollan principalmente en sitios planos o de pendientes suaves, por lo general en terrazas, planicies y fondo de los valles, con inundaciones periódicas o estacionales.

III.7. Vegetación y flora.

De acuerdo con la interpretación de imágenes satelitales, recorridos en el campo e información bibliográfica consultada, los principales tipos fisionómicos de vegetación presentes en el área son bosque de pino – encino; bosque de pino; bosque de encino; bosque mésofilo de montaña; selva alta perennifolia y la vegetación secundaria con pastizales.

- ✓ Bosque de Quercus spp (encino) y Pinus spp (pino)

Los pinares (bosques de Pinus), junto a los encinares (bosques de Quercus), son las comunidades vegetales más extendidas de las zonas de climas templados o semifríos del país, desde los subtipos semisecos hasta los subhúmedos, mayormente pertenecientes al tipo de clima Cw.

Figura 37. Bosque de *Quercus spp y Pinus spp* en la cercanía de la C. H. Necaxa. Fotografía del autor, 2006.

Fisonómicamente pueden distinguirse diversas variantes con formas de matorrales, árboles bajos, medianos y altos. Algunos siempreverdes, otros semideciduos o totalmente caducifolios, que pueden predominar plantas de hojas pequeñas, de tamaño medio o muy grande, de igual dureza y grosor. Las diferentes representaciones de esta comunidad vegetal están relacionadas con las condiciones ambientales. La presencia de epífitas es variable y depende en buena medida de las condiciones climáticas, principalmente de la humedad atmosférica y de la temperatura, factores que determinan también la abundancia de plantas trepadoras leñosas. Aparecen en los alrededores de Patla y Tepexca, donde las especies más comunes del estrato arbóreo son: *Quercus martensiana, Q. excelsa, Q. sororia, Q. calophylla, Q. crassifolia, Q. stipularis, Q. affinis, Liquidambar styraciflua, Clethra quercifolia, C. Alcoceri, Crataegus sp.* (tejocote), *Alnus acuminata* (alnus, ilite), *Arbutus xalapensis*, *Meliosma alba* y *Carpinus caroliniana*. En el estrato arbustivo dominan *Cyathea mexicana*, *Oreopanax xalapensis*, *Conostegia arborea*, *Turpinia pinata*, *Vaccinum leucanthum*, *Gaulteria hidalgensis*, *Rapanea ferruginea*, *Eugenia capuli* y *Eupatorium sp*.

También destaca la presencia de epífitas, tales como: *Tillandsia usneoides, Tillandsia spp.*; gran cantidad de helechos como *Phlebodium areolatum, Campyloneuron phyllitides*, y orquídeas como *Notylia barkerii*, entre otras.

- ✓ Bosque de Pinus spp (pino)

Se trata de comunidades forestales con una fisonomía bien definida, dada por la morfología de las hojas de los árboles dominantes, y común en lugares de climas fríos, templados y semicálidos, así como la convivencia con otras especies, como *Juniperus, Abies y Quercus*.

Para el área de estudio, esta formación ocupa las partes altas superiores a los 2,200 m de altura en los alrededores de Zacatlán y Chignahuapan, al este de Pueblo Nuevo y al sur de Ahuazotepec, Cerro Zempoala, Cerro La Bandera, al sur de Venta

Grande, así como los cerros ubicados al sur de la presa El Tejocotal, alrededores de la presa Los Reyes y alrededores de Huauchinango.

En el estrato arbóreo dominan las especies *Pinus patula var patula, P. pseudostrobus var apulcensis* (pino lacio), *P. ayacahuite, P. montezumae y P. teocote, Quercus crassifolia, Q. Crassipes, Alnus acuminata* (aile, ilite), y *Arbutus xalapensis* (madroño). En el estrato arbustivo predomina *Baccharis conferta, Eupatorium ligustrunum, Myrica pringlei, Ternstroemia sylvatica, Senecio sinuatus, Vaccinum sp*. En el estrato herbáceo se encuentran especies como *Alchemilla pectinata, Fragaria mexicana, Acaena elongata, Chimaphilla umbellata, Bidens triplinervia, B. odorata, Desmodium sp. Lopezia hirsuta, Gautteria ciliata y Pteridium aquilinum.*

En sectores aislados al sur de la presa Necaxa y poniente del poblado de Tenango de las Flores, se encuentran poblaciones reforestadas de masas puras de *Pinus patula var patula* con individuos que alcanzan una altura de 20 m, asociados a *Pinus pseudostrobus var apulcensis*, o bien en transición con elementos de bosque mesófilo de montaña, como *Oreopanax* y helechos arborescentes como *Cyathea fulva*, con algunas epífitas de *Tillandsia sp*.

- ✓ Selva alta perennifolia

Conocida también como Bosque tropical perennifolio, este tipo de vegetación ocupaba hace tiempo una amplia y continua extensión en el este y sureste de México, desde la región de Tamazunchale y Ozuluama; al sureste de San Luis Potosí y norte de Veracruz; a lo largo del estado de Veracruz y algunas regiones

limítrofes de Hidalgo, Puebla y Oaxaca, hasta el noreste de Tabasco.

Figura 38. Selva alta perennifolia antropizada en la cercanía de la C. H. Patla. La especie arbórea dominante es *Bursera spp* (Palo mulato). Fotografía del autor, 2006.

Se desarrolla entre altitudes de 0 a 1000 msnm, aunque en algunas partes puede encontrarse hasta los 1500m. Es una comunidad biológica compleja, en la cual predominan árboles perennifolios de más de 25 m de alto y una comunidad de epífitas como orquídeas, helechos y bromelias de gran tamaño.

Este tipo de vegetación cubría las partes bajas de las laderas de las elevaciones y los bosques de galerías. En la actualidad, quedan algunas zonas relictas en los alrededores de Patla; al sur de Filomeno Mata; al este de Xicotepec y en las áreas más inaccesibles. Algunas de las especies son: *Brosimum alicastrum, Ceiba pentandra, Bursera simaruba, Tabebuia pentaphylla, Calocarpum sp., Trichilia sp., Misanteca sp., Castilla elastica, Trophis racemosa, Spondias mombin, Swietenia macrophylla* y *Cedrela odorata.*

Figura 39. Selva alta perennifolia antropizada con fragmentos de agricultura itinerante (Cafetos), sobre un deslizamiento traslacional en la cercanía de la C. H. Patla. Fotografía del autor, 2006.

- ✓ Bosque mesófilo de montaña

Es una formación vegetal con una alta biodiversidad. El estrato arbóreo está formado por árboles corpulentos y follaje denso, con alturas entre 30 y 40 m, así como un estrato arbustivo variado, que contribuyen a incrementar el dosel del bosque, proporcionando un ambiente húmedo y sombrío en su interior. La abundancia de epífitas, helechos arborescentes, musgos y hongos es una característica distintiva en condiciones de nulo disturbio antrópico.

En el territorio quedan manchas de relictos; principalmente en las laderas abruptas de barrancas, cerca de Patla, Tepexic, sur de Xicotepec y sur de Huachinango. Algunas de las especies presentes son *Cyathea mexicana; Alsophylla sp.;Liquidambar styraciflua; Carpinus caroliniana; Clethra quercifolia; Meliosma alba; Alnus arguta, (aile, ilite); Quercus sororia; Q. furfuraceae, Q. acatanangensis, Q.*

trinitatis, Q. xalapensis, Phoebe chinantecorum, Beilchmiedia mexicana, Persea americana var. Angustifolia; Turpinia pinata y *Platanus mexicana*, entre otras.

- ✓ Vegetación secundaria y pastizales

Se localiza en los alrededores de los vasos de las presas y en los terrenos agrícolas abandonados. Las especies más comunes son: *Digitaria decumbens* (pangola), *Paspalum vaginatum* (grama) y *Panicum maximum* (guinea).

Figura 40. Bosque de galería y vegetación acuática en el río Necaxa, inmediaciones de la C. H. Patla. Fotografía del autor, 2009.

Los acahuales están representados por *Platanus mexicana* y se encuentran a lo largo de los ríos Necaxa y Patla.

Figura 41. Bosque forestal cultivado de *Pinus spp* para venta de árboles de Navidad. Cercanías de Nuevo Necaxa. Fotografía del autor, 2009.

IV. Análisis de los datos para la construcción de los escenarios de susceptibilidad.

Para la consecución del objetivo general y los objetivos particulares propuestos, las fases de trabajo siguen la estructura de la extracción del conocimiento a partir de las bases de datos mostradas en la figura 12, mismas que comprenden cinco etapas: integración y recopilación; selección, limpieza y transformación; minería de datos; evaluación e interpretación; difusión y uso (figura 42).

IV.1 Etapas de trabajo.

a. Integración y recopilación de datos

En esta fase se incluyeron los trabajos preparatorios para el reconocimiento de las áreas que presentan movimientos de masa y los factores que provocan los mismos. Se subdividió en:

- ✓ Identificación de los objetivos propuestos y caracterización de los movimientos de gravitacionales

Una vez definidos e identificados los objetivos del trabajo se llevó a cabo la revisión bibliográfica de las fuentes digitales y analógicas con objeto de entender los mecanismos de rotura, transporte y deposición de materiales; los factores preparatorios y los disparadores que provocan movimientos de masa, de acuerdo a las experiencias referidas a México y otras latitudes. Con ello se generó una base de datos bibliográficos con más de 3,700 referencias procesadas mediante el software EndNote x7.01, fabricado por la empresa Thomson Reuters (http://thomsonreuters.com/en.html).

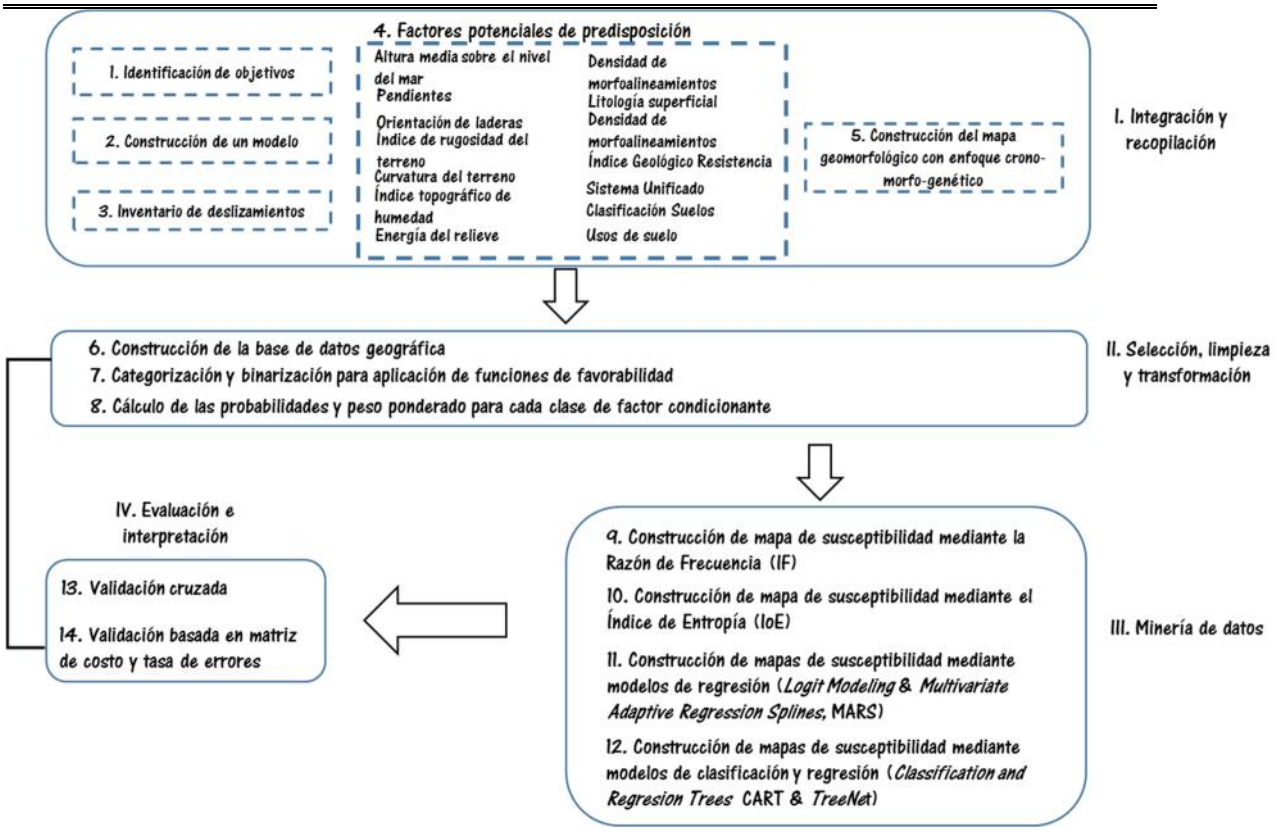

Figura 42. Diagrama de flujo de trabajo.

A partir de la revisión bibliográfica se decidió utilizar la clasificación de los movimientos de masa de Dikau y colaboradores[168], no sólo por su sencillez si no por la similitud de las condiciones del territorio bajo estudio. Conviene señalar que la equivalencia al español de los términos en inglés se tomó del trabajo de Alcántara-Ayala [169] , antes citado.

La clasificación se fundamenta en cinco tipos de movimientos básicos: *a*) deslizamientos (rotacional y translacional), *b*) desprendimientos, *c*) expansión lateral, *d*) flujos y movimientos complejos y *e*) vuelcos; todos sobre rocas o *regolitos* en general. Los deslizamientos son aquellos movimientos que ocurren sobre una superficie fracturada o cizallada, de forma semicircular (rotacionales) o planares

[168] Dikau, Richard, D. Brunsden, L. Schrott and M. Ibsen, eds. *Landslide Recognition. Identification, Movement and Causes.* Chichester: John Wiley & Sons, 1996.
[169] Alcántara-Ayala, I. *Ibídem.* 2000.

(translacionales). Los desprendimientos comprenden el movimiento del material en caída libre en taludes con ángulos cercanos a la vertical. La expansión lateral ocurre en pendientes casi planas con movimientos muy lentos. Los flujos son paquetes de materiales que presentan un movimiento fluído, mientras que en los movimientos complejos se combinan varios tipos. El vuelco es muy similar al desprendimiento, pero con cierto grado de basculamiento.

Caracterizados los tipos de movimientos se procedió a elaborar un modelo empírico de roturas que permitiera -entre otras funciones-, una selección precisa de los factores potenciales preparatorios y disparadores de los movimientos.

- ✓ Construcción del modelo de roturas de laderas.

Durante los recorridos de campo se observó que los deslizamientos superficiales activos (derrubios/flujos) y los movimientos complejos de rocas estaban distribuidos en laderas controladas por condiciones locales, no coexistentes entre ellas. En el primer caso, los derrubios activos y las cicatrices (escarpes) inactivas (figura 43) se localizaban en la parte media de las laderas, independientemente de si estaban cubiertos de vegetación, pero dominando determinados tipos de rocas como rocas terrígenas carbonatadas (calizas con limolitas-lutitas) y basaltos - andesitas de estructura globular / vesicular. En el caso de los deslizamientos complejos rotacionales, -como el ocurrido en el cerro de Necaxatépetl (figura 44)-, el clivaje de las rocas es paralelo o *cuasi* paralelo a la línea de máxima pendiente y las fracturas son perpendiculares a las superficies topográficas. Sin embargo, en movimientos de caídas de rocas -como el caso de Patla en 1998-, la ladera aparece desnuda con paquetes de calizas intercaladas con lutitas, proporcionando rasgos de debilidad que favorecen la infiltración de agua y el aumento de presiones positivas en la roca. (figura 44).

Figura 43. Escarpes de deslizamientos en las márgenes del río Necaxa. Fotografía del autor, 2006.

Cuando los movimientos gravitacionales se ubican sobre regolitos, las evidencias indican que bien pudieron iniciar como: *a*) movimientos traslacionales sobre superficies deslizantes en el límite suelo-roca madre; *b*) sobre planos de estratificación de rocas terrígenas carbonatadas o *c*) en las inmediaciones de las fracturas del material parental (figuras 45). Posteriormente los movimientos se convirtieron en flujos o derrubios por la acumulación de agua, permitiendo el recorrido y volumen de los deslizamientos asociados al contenido de material arcilloso en el regolito, gracias a la presencia constante de agua surgente de los intersticios y /o fracturas de la roca (figura 46), similar a lo que describen Capra y colaboradores, en Zapotitlán de Méndez[170]. En los alrededores de las plantas

[170] Capra, Lucia, José Lugo-Hubp and Norma Dávila-Hernández. "Fenómenos de remoción en masa en el poblado de Zapotitlán de Méndez, Puebla: Relación entre litología y tipo de movimiento." *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 20, no. 2 (2003): 95-106.

hidroeléctricas de Patla y Tepexi, en los contactos entre rocas volcánicas extrusivas y carbonatadas del Mesozoico, dominan innumerables derrubios (Figura 46) debido a la alternancia litológica con diferentes competencias y permeabilidades, tal como lo reconocieron en campo Capra y colaboradores[171], en Totomoxtla.

Figura 44. Deslizamiento del cerro Necaxatepetl, visto desde la cortina de la presa Necaxa. Fotografía del autor, 1 de noviembre de 2006.

En las zonas de recorrido, los deslizamientos de flujos o derrubios se localizaron en las partes más altas de las laderas, aun cuando permanecen cubiertas de vegetación, preferentemente en hondonadas litológicas o cicatrices de escarpes.

[171] Capra, Lucia, José Lugo-Hubp and José Juan Zamorano-Orózco. "La importancia de la geología en el estudio de los procesos de remoción en masa: El caso de Totomoxtla, Sierra Norte de Puebla, México." *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* LVIII, no. 2 (2006): 205-214.

Figura 45. Cicatrices en el escarpe de la formación Tamán, Patla. Fotografía del autor, 2006.

Figura 46. Fracturas en el basalto rellenas de material detrítico, Patla. Fotografía del autor, 2006.

Figura 47. Cicatrices de deslizamientos complejos en calizas y lutitas, Arroyo Seco, Xaltepuxtla. Fotografía del autor, 2006.

La interpretación de los movimientos gravitacionales adquiere varios significados para los factores causales, de acuerdo a la localización. Por una parte, la vegetación no siempre funciona como agente estabilizador, pues depende de la estructura fisionómica y el espesor de la capa de suelo, si éstos favorecen la infiltración o estabilización mediante las raíces. En los casos de suelos delgados o regosoles sobre limolitas o lutitas intemperizadas, las raíces rompen la cohesión y resistencia del material litológico, disgregando los fragmentos de material.

En otro sentido, el agua de precipitación requiere una dimensión de área suficiente para infiltrase y actuar sobre la presión de los poros y producir roturas en la ladera. Éstas dominan en hondonadas y formas cóncavas que tienden a concentrar las aguas superficiales y subterráneas sobre los mayores espesores de depósitos coluviales. En algunos límites de unidades geomorfológicas los interfluvios (laderas convexas) donde diverge el agua de escorrentía no se observaron roturas de laderas. Otro elemento interpretado a partir las observaciones en campo son las

longitudes de las laderas pues, al incrementarse la longitud, aumenta las tensiones de corte en las superficies potenciales de ruptura.

Con las experiencias del trabajo de campo y la revisión bibliográfica se construyó un modelo a verificar que representara la menor complejidad de interacción entre los factores preparatorios, permitiendo la construcción de una leyenda para la fotointerpretación de imágenes y la selección de *áreas claves* en la restitución fotogramétrica digital. Debe quedar sentado que el modelo sólo incorporó los movimientos superficiales (flujos), dado que para los movimientos complejos se utilizan metodologías determinísticas con ecuaciones de laderas infinitas, misas que rebasan los objetivos propuestos en esta tesis.

El modelo simple de laderas posee las siguientes condiciones:

a) La ladera está formada por una litología impermeable que no recibe aportes de otras laderas vecinas.
b) Sobre la litología yacen formaciones superficiales permeables y susceptibles de deslizarse, pues posee la suficiente cantidad de materiales arcillosos e intersticios que permiten la infiltración de agua de lluvia.
c) Si los depósitos sobre las laderas son removidos, la litología queda expuesta a las consecuencias de los procesos erosivos hasta, finalmente, fracturarse al recibir el aporte de agua de lluvia que infiltra e incrementa la presión de los poros.
d) El factor desencadenante de las roturas de laderas es la precipitación pluvial en la cuenca, misma que se infiltra en la formación superficial o en el substrato alterado. El aumento de las presiones de agua en los poros es el responsable de la reducción de la resistencia al corte del regolito y, por tanto, de la rotura de la ladera.

A partir de este modelo se puede afirmar que cuanto más extensa y profunda sea la formación superficial y, por ende, la ladera, aumentan las posibilidades que provocan los deslizamientos superficiales a causa de la generación de presiones positivas del agua en los poros.

El planteamiento anterior responde a un proceso continuo de denudación–transporte–deposición que, en las condiciones reales del territorio es excepcional porque, como se sabe, la mayoría de las laderas en el área de estudio están compuestas de diferentes materiales litológicos y los procesos genéticos geomórficos actúan en distintas escalas espaciales y temporales, con un rango amplio de magnitudes y frecuencias.

El modelo teórico empleado considera los planteamientos de Kojima y Obayashi[172] quienes señalan a los factores disparadores de los deslizamientos como *factores no observados* pero utilizados en la predicción de la susceptibilidad a los deslizamientos, en términos de tiempo y espacio. Según los autores, este planteamiento sirve para desentrañar aquel o aquellos factores desencadenantes que están "enmascarados" al interior de las relaciones entre los factores causales preparatorios, al considerar a los datos de ocurrencia de deslizamientos como variables causales también.

- ✓ Inventario de movimientos de masas.

El inventario de eventos de deslizamientos es la representación de la distribución espacial de las áreas de acumulación y erosión inducida por la gravedad[173]. El procedimiento puede incluir información sobre la tipología y el estado de actividad de los movimientos de masa[174], pero no siempre es posible determinar la ruptura de la pendiente, la trayectoria del movimiento y el volumen del material removido (figura 48).

[172] Kojima, Hirohito and Shigeyuki Obayashi. "An Inverse Analysis of Unobserved Trigger Factor for Slope Stability Evaluation." *Computers & Geosciences* 32, no. 8 (2006): 1069-1078.
[173] Guzzetti, Fausto, Alberto Carrara, Mauro Cardinali and Paola Reichenbach. "Landslide Hazard Evaluation: A Review of Current Techniques and Their Application in a Multi-Scale Study, Central Italy." *Geomorphology* 31, (1999): 181-216.
[174] Brunsden, Denys "Mass Movement; the Research Frontier and Beyond: A Geomorphological Approach." *Geomorphology* 7, (1993): 85-128.

Los mapas de inventarios se clasifican en dos tipos[175]: (1) los inventarios de eventos que están directamente asociados a los factores disparadores como terremotos o lluvias intensas y (2) los inventarios "históricos" (geomorfológicos) que representan la suma de varios eventos en el tiempo y en el territorio. En este trabajo de tesis se utilizó el segundo tipo, con resultados satisfactorios que cumplen con las definiciones formales propuestas por Guzetti[176].

Para la realización de la cartografía de inventarios se asumió que:

a) "El pasado es la clave del futuro". El viejo principio del actualismo geológico es ampliamente utilizado durante esta etapa. Las roturas futuras de las laderas naturales ocurrirán bajo las mismas condiciones físico geográficas (geomorfológicas, hidrológicas, etc.) que ocurrieron en el pasado y ocurren en la actualidad.
b) Los deslizamientos dejan huellas perceptibles que pueden reconocerse, clasificarse y cartografiarse a través de la interpretación estereoscópica de fotografías aéreas, imágenes satelitales y modelos digitales de la superficie terrestre. La mayoría de las huellas son morfológicas, mientras que otras pueden reflejar la litología, la estructura geológica, los usos de suelo u otros cambios en la superficie terrestre.
c) La huella morfológica de un deslizamiento dependerá del tipo de movimiento (flujo, caídas de rocas, compuestos, etc.) y del índice de clasificación de la velocidad del movimiento. En general, cada tipo de movimiento de masa deja una huella morfológica única que puede *leerse* e interpretarse por un experto.
d) Por último, los deslizamientos no se producen sin causa aparente. Los fallos en las laderas son el resultado de la interacción de leyes físicas y mecánicas que controlan la estabilidad de las laderas. Las leyes que controlan el

[175] Malamud, Bruce D., Donald L. Turcotte, Fausto Guzzetti and Paola Reichenbach. "Landslide Inventories and Their Statistical Properties." *Earth Surface Processes and Landforms* 29, no. 6 (2004): 687-711.
[176] Guzzetti, Fausto. "Landslide Hazard and Risk Assessment." RHEINISCHEN FRIEDRICH-WILHELMS-UNIVESTITÄT BONN, 2005.

tamaño, la forma y la evolución espacial y temporal de los deslizamientos se pueden inferir de manera empírica o determinística; por lo tanto, este conocimiento se puede generalizar y extrapolar a otras áreas.

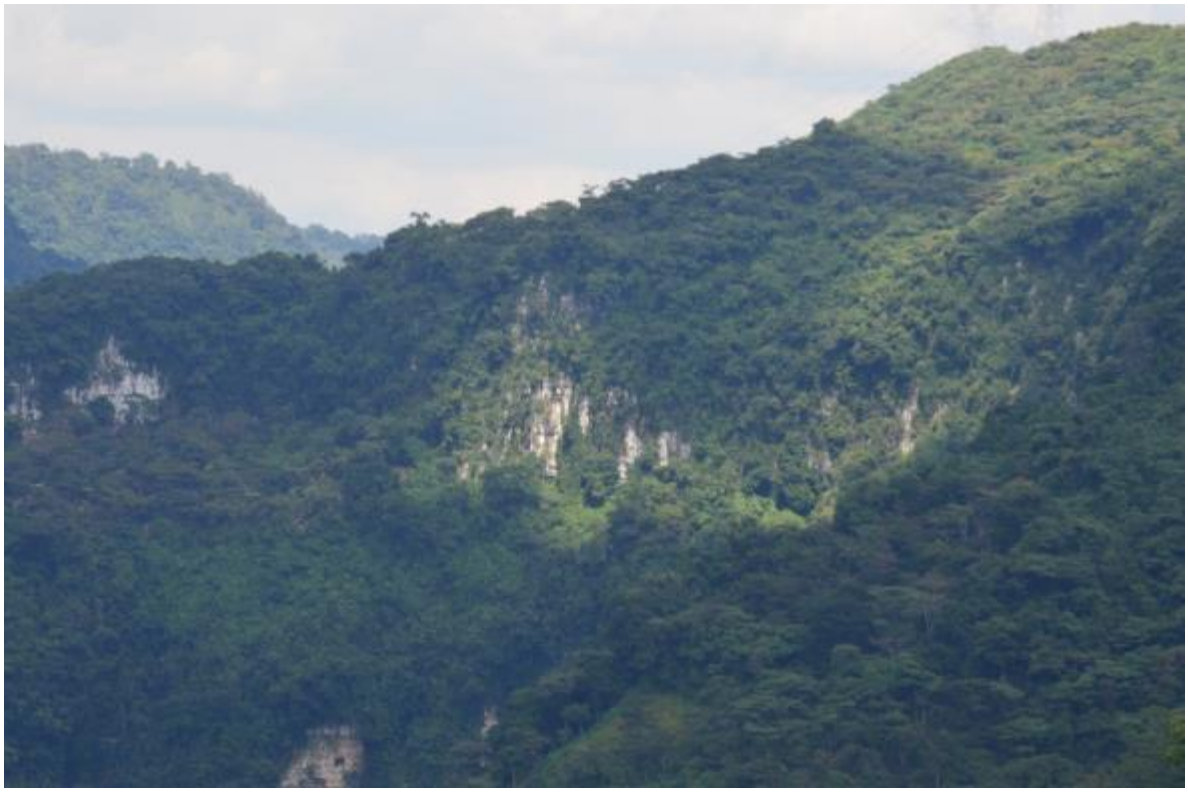

Figura 48. Cicatrices de deslizamientos activos en escarpes de calizas con lutitas, márgenes del río Xaltepuxtla. Fotografía del autor, 2009

El inventario constituyó la pieza fundamental para el análisis espacial de la susceptibilidad, así como para la posterior validación de los resultados obtenidos de los modelos probabilísticos de susceptibilidad, mientras que la producción cartográfica de los deslizamientos lo es para los estudios geomorfológicos de carácter regional. Muchos autores representan el fenómeno individual con un

polígono envolvente, remarcando la corona y la zona de acumulación del material, además de la tipología del movimiento[177],[178],[179].

A partir de la interpretación fotográfica de los rasgos morfológicos y las condiciones de la vegetación y el drenaje (figura 49), se construyó una base de datos de deslizamientos reconocidos en las ortofotos y digitalizadas en ArcGIS 10.3. Por razones de escala y generalización cartográfica se colocó un punto en el centroide del área del escarpe o corona cuando se identificó en la fotografía aérea.

Figura 49. Deslizamiento sobre material piroclástico consolidado en las barrancas de Huauchinango. Fotografía de Dulce María del Carmen Benítez Martínez, 16 de septiembre de 2016.

[177] Varnes, D. J. *Landslide Hazard Zonation: A Review of Principles and Practice*. UNESCO, 1984.
[178] Corominas, Jordi and José Moya. "A Review of Assessing Landslide Frequency for Hazard Zoning Purposes." *Engineering Geology* 102, no. 3-4 (2008): 193-213.
[179] van Westen, Cees J., Enrique Castellanos and Sekhar L. Kuriakose. "Spatial Data for Landslide Susceptibility, Hazard, and Vulnerability Assessment: An Overview." *Engineering Geology* 102, no. 3-4 (2008): 112-131.

El procedimiento inicial para la construcción del inventario fue la restitución fotogramétrica digital de un vuelo aerofotográfico a escala 1:20,000, con fecha de diciembre de 2010. Se restituyeron 13 líneas de vuelo, dirección Norte-Sur con 12 fotos por línea y un total de 155 ortofotos, a una resolución espacial de 0.40 m. Se utilizó el software Leica Photogrammetry Suite 2014 de Leica Geosystems en una estación fotogramétrica digital con lentes de obturador activo 3D NuVision a 120 Hz, resolución de 1,920 pixeles x 1,080 pixeles y un mouse Global Geo/Immersion SoftMouse 3D.

Todos los deslizamientos visibles se fotointerpretaron, incluso aquellas evidencias que sugirieran serlo; posteriormente, muchas de ellas se comprobaron en el campo (figura 50). La mayor dificultad consistió en detectar las evidencias geomorfológicas en zonas cubiertas de vegetación o en aquellas que tenían sombras orográficas o nubes.

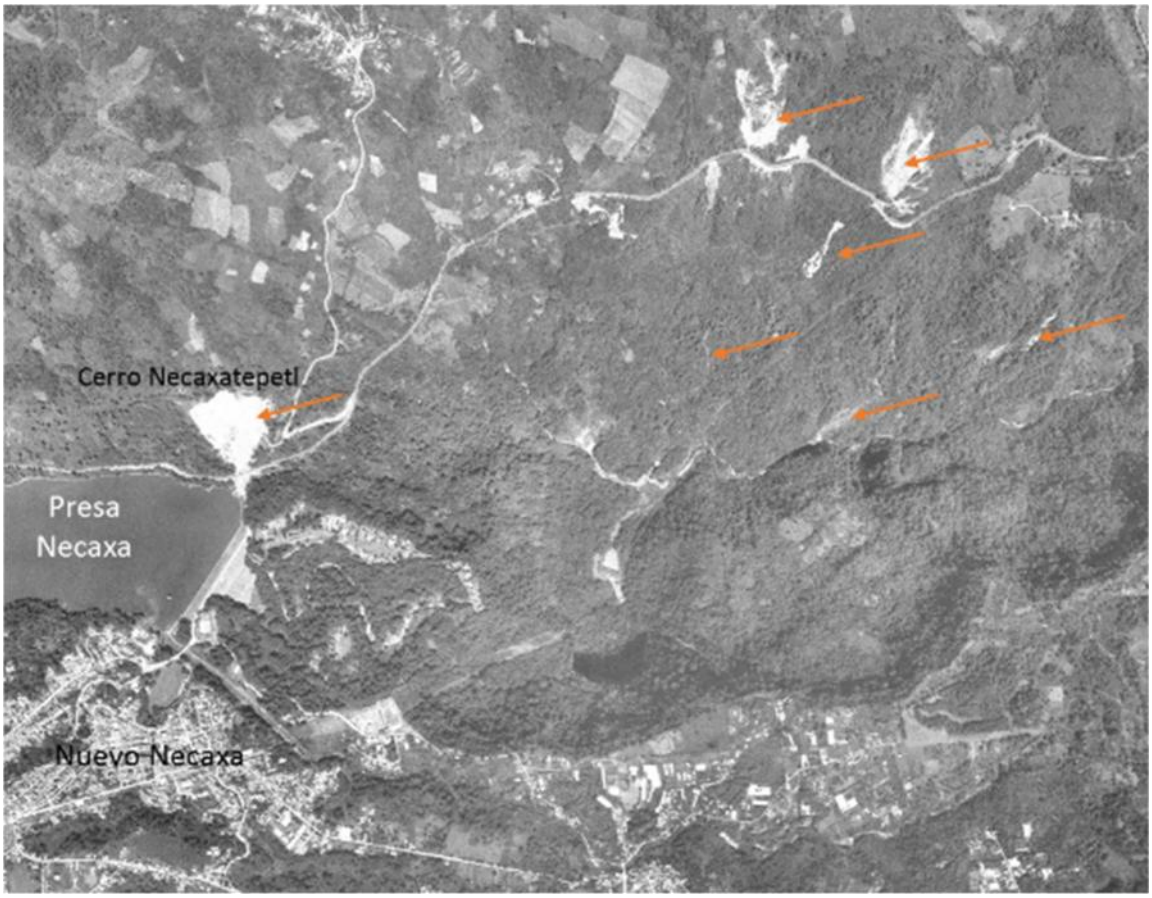

Figura 49. Recorte de ortofoto 1:20,000 (diciembre 2010) sobre la presa Necaxa e indicaciones del deslizamientos complejos y flujos.

Se contabilizaron 997 eventos en total; de ellos, 272 corresponden a desprendimientos o caídas (27.28 %); 322 a deslizamientos -rotacionales y translacionales- (32.30%), en una superficie media de 5,309.21 m^2; una mínima de 576.34 m^2 y una superficie máxima de 113,047.68 m^2. Los flujos inventariados representan el 40.42 % (403) con una superficie media de 6,164.86 m^2; una mínima de 576.34 m^2 y una máxima de 94,424.37 m^2.

Los eventos que fueron modelados estadísticamente corresponden a los deslizamientos y los flujos porque se les pudo calcular la superficie de afectación.

Figura 50. Gráfico de inventario de eventos.

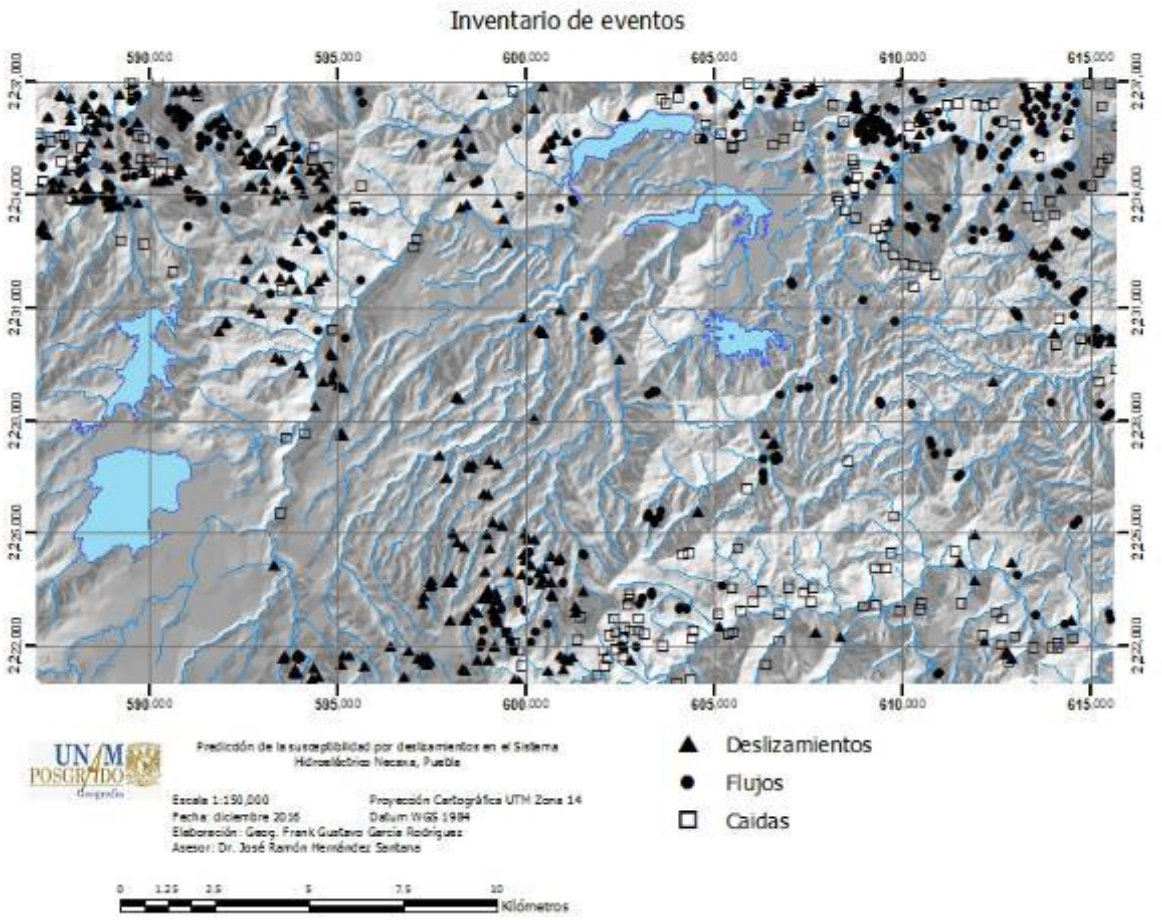

Figura 51. Mapa de inventario de eventos.

- ✓ Selección de los factores potenciales causales preparatorios que intervienen en el proceso.

Una vez concebido y construido el modelo de roturas de las vertientes se procedió a seleccionar el conjunto de factores causales potenciales (tabla 7) que refuerzan la condición de inestabilidad crítica de las laderas. La condición previa para la selección óptima de las variables debió cumplir con:

a) Atributos estocásticos provenientes de fuentes primarias en el tratamiento de los datos: fotografías aéreas; imágenes de satélite y trabajo de campo.

b) Facilidad en la construcción de la cartografía temática digital mediante algoritmos geoespaciales utilizados en disímiles contextos geográficos, asegurando minimizar costos y tiempos de adquisición.

c) Determinación de variables cuyos atributos y significados físicos-geográficos fueran susceptibles de ser interpretados tanto de manera conjunta o de forma individual.

NOMBRE DE VARIABLE	DOMINIO DE VARIABLE	NOMBRE DE LA CLASE	NOMBRE DE LAS CATEGORÍAS
ESPECTRO DE CATEGORÍAS BÁSICAS DEL RELIEVE	Continuo	Complejo de categorías del relieve	Planicies mesiformes (20 m < H < 40 m)
		(5)	Planicies colinosas (40 m < H < 120 m)
			Premontañas (300 m < H < 600 m)
			Montañas bajas (600 m < H < 1,200 m)
			Montañas medias (1,200 m< H < 2,520 m)
GRADIENTE DE PENDIENTE	Continuo	Complejo de pendientes	Suavemente inclinada (0° - 6°)
		(7)	Medianamente inclinada (6° - 8°)
			Muy inclinada (8° - 10°)
	Á		Medianamente escarpada (10° - 15°)
			Escarpada (15° - 30°)
			Muy escarpada (30° - 45°)
			Abrupta (> 45°)
ORIENTACIÓN DE LA LADERA	Continuo	Clases de orientación de laderas	Plano
		(10)	Norte (0° - 22.5°)
			Noreste (22.5° - 67.5°)
			Este (67.5° - 112.5°)
			Sureste (112.5° - 157.5°)
			Sur (157.5° - 202.5°)
			Suroeste (202.5° - 247.5°)
			Oeste (247.5° - 292.5°)
			Noroeste (292.5° - 337.5°)
			Norte (337.5° - 359.5°)

RUGOSIDAD DEL TERRENO	Continuo	Índice de rugosidad (%)	0 -1.89
		(7)	1.89 - 4.83
			4.83 -7.57
			7.57 -10.51
			10.51 -14.51
			14.51 - 21.67
			21.67 - 53.65
CURVATURA	Continuo	Clases de curvaturas de laderas	Cóncavo - Cóncavo (V/V)
		(9)	Recto - Cóncavo (GE/V)
			Convexo - Cóncavo (X/V)
			Cóncavo- Recto (V/GR)
			Recto - Recto (GE/GR)
			Convexo - Recto (X/GR)
			Cóncavo - Convexo (V/X)
			Recto - Convexo (GE/X)
			Convexo - Convexo (X/X)
ÍNDICE TOPOGRÁFICO DE HUMEDAD	Continuo	Índice topográfico de humedad (5)	2.65 - 6.25
			6.25 - 8.70
			8.70 - 11.90
			11.90 - 15.83
			15.83 - 23.52
ÍNDICE DE ENERGÍA DEL RELIEVE	Continuo	Energía del relieve (m/km2)	60 - 80
		(5)	80 - 100
			100 - 250
			250 - 500
			> 500
DENSIDAD DE MORFOALINEAMIENTOS	Continuo	Den. de morfoalineamientos (km/km2)	0.0 - 0.5
		(8)	0.5 - 1.5
			1.5 - 2.5
			2.5 - 3.0
			3.0 - 3.5
			3.5 - 4.5
			4.5 - 5.5
			5.5 - 8.7
LITOLOGÍA SUPERFICIAL	Discreta	Litología superficial	Huayacocotla (Lu-Lm-Cgp)
		(10)	Cahuasas (Lm-Ar-Cgp)
			Santiago/Tepexi/Tamán/Pimienta (Cz-Lu-Lm)

			Tamaulipas inferior/Agua Nueva (Cz -Lu)
			San Felipe (Lu – Cz)
			Méndez (Lu – Mg)
			Basaltos / Andesitas
			Dacitas / Riolitas
			Piroclastos
			Depósitos aluviales
ÍNDICE GEOLÓGICO DE RESISTENCIA	Discreta	GSI	0 - 5
		(6)	5 - 10
			10 - 20
			20 - 30
			30 - 40
			40 - 50
SISTEMA UNIFICADO CLASIFICACIÓN SUELOS	Discreta	SUCS	SP/GC
		(10)	GC/SP/SC
			SM/SC
			GP/SC
			GP/SP
			GP/SM
			GP/SCGP/SC
			GM/SM
			GC/SC/OH
			SP/SC
COBERTURAS DE SUELO	Discreta	Cobertura de suelo	Selva húmeda
		(8)	Bosques templados
			Suelo agrícola
			Cuerpos de agua
			Asentamientos humanos
			Pastizales
			Vegetación secundaria
			Otros elementos antrópicos

Tabla No. 7. Variables predictoras seleccionadas.

En los trabajos publicados sobre modelos de susceptibilidad a deslizamientos se pueden encontrar diversos predictores que describen principalmente los factores

preparatorios[180]. Para el presente caso, tanto los factores seleccionados como sus limitaciones han sido ampliamente analizados en diversas publicaciones como la citada anteriormente.

Desde el punto de vista del tratamiento estadístico espacial de los datos, se clasificaron las variables utilizadas en las de tipo continuo y tipo discreto.

Las variables de tipo continúo consideradas son:

- Espectro de categorías básicas del relieve. REL. Variable obtenida a partir del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) de 15 m de resolución espacial, construida mediante la restitución fotogramétrica digital de las ortofotos y la corrección de la red de drenaje base (figura 52).

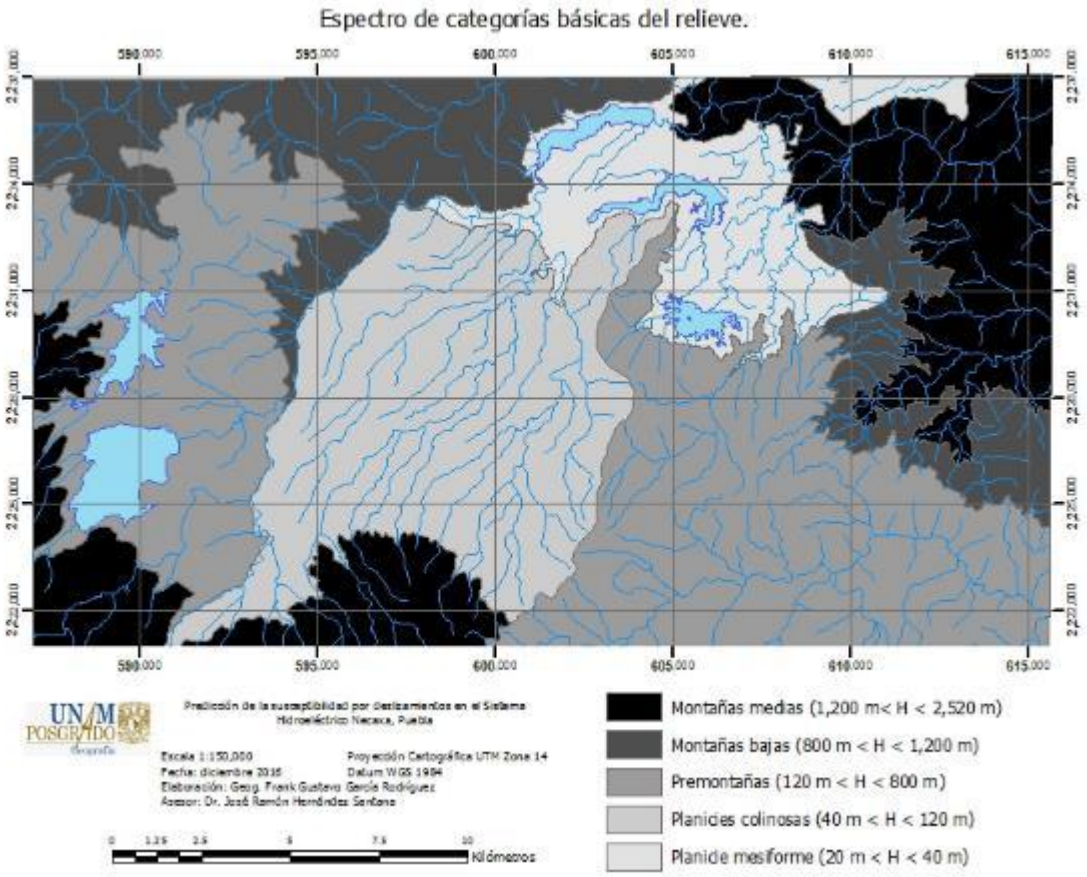

Figura 52. Espectro de las categorías básicas del relieve.

[180] van Westen, Cees J., Enrique Castellanos and Sekhar L. Kuriakose. "Spatial Data for Landslide Susceptibility, Hazard, and Vulnerability Assessment: An Overview." *Engineering Geology* 102, no. 3-4 (2008): 112-131.

- Pendiente de la ladera. PEND. Ángulo expresado en grados (0° a 90°) que se forma entre la superficie del terreno y una línea horizontal. Se construyó en ArcGIS a partir del Modelo Digital de Elevaciones, y corresponde a la deriva de primer orden de la altura sobre el nivel del mar. Es la razón máxima del cambio de elevación que influye sobre las tasas de flujo de agua y sedimento (figura 53).

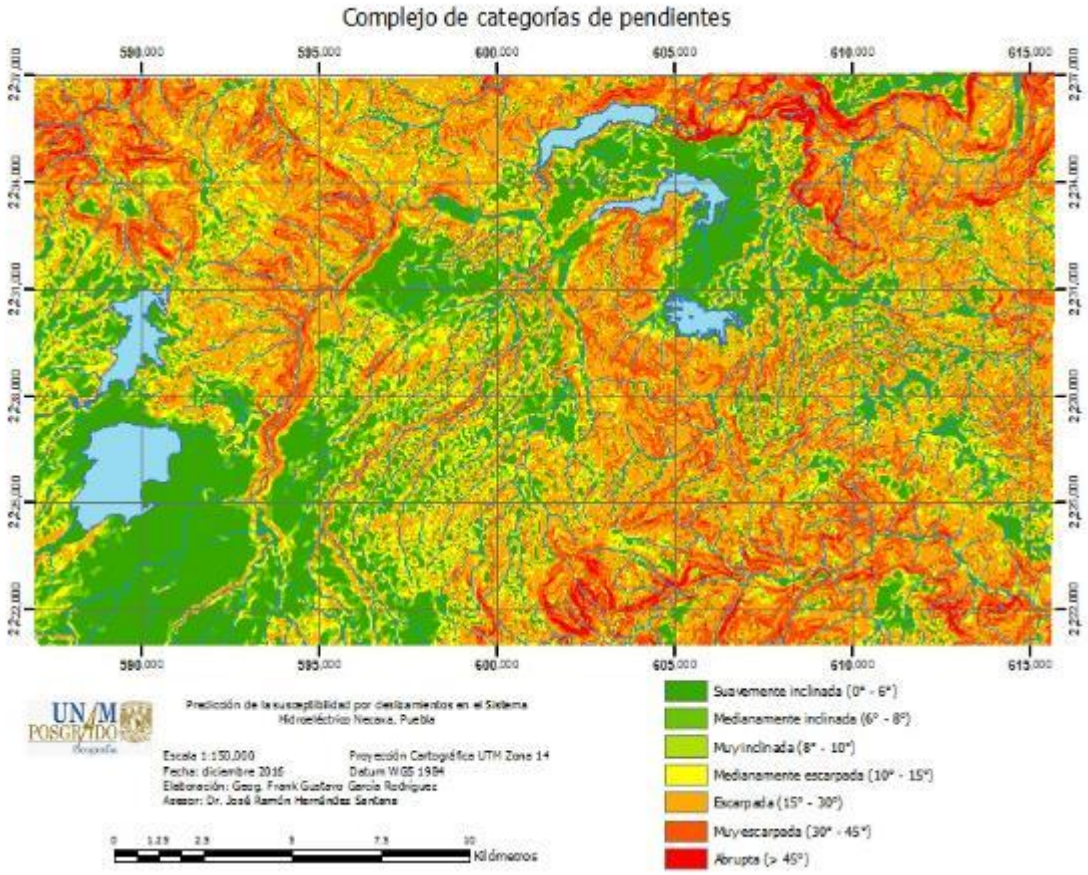

Figura 53. Mapa de ángulos de laderas reclasificado en categorías de inclinación de laderas

- Orientación de la ladera. ORIENT. Dirección de la exposición de la ladera. Es una variable obtenida del MDE en ArcGIS, medida en grados sexagesimales, de 1° a 360°. A partir de la orientación de la ladera es

posible obtener información indirecta sobre la humedad del suelo, el ambiente y el tipo y densidad de la vegetación (figura 54).

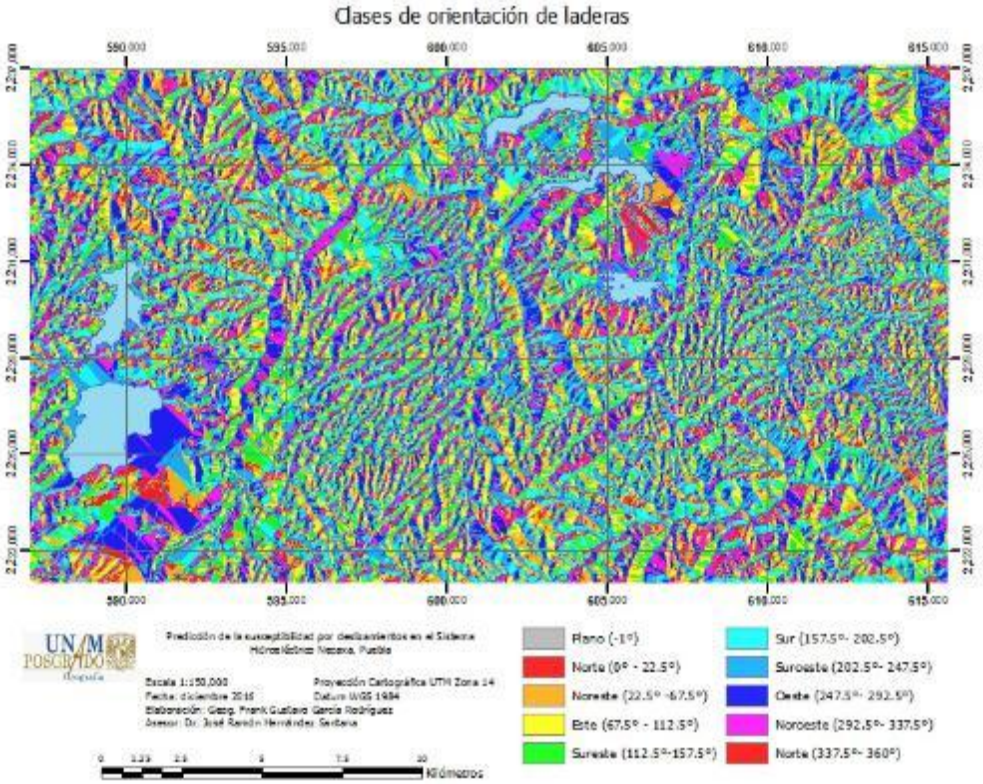

Figura 54. Mapa de orientación de laderas.

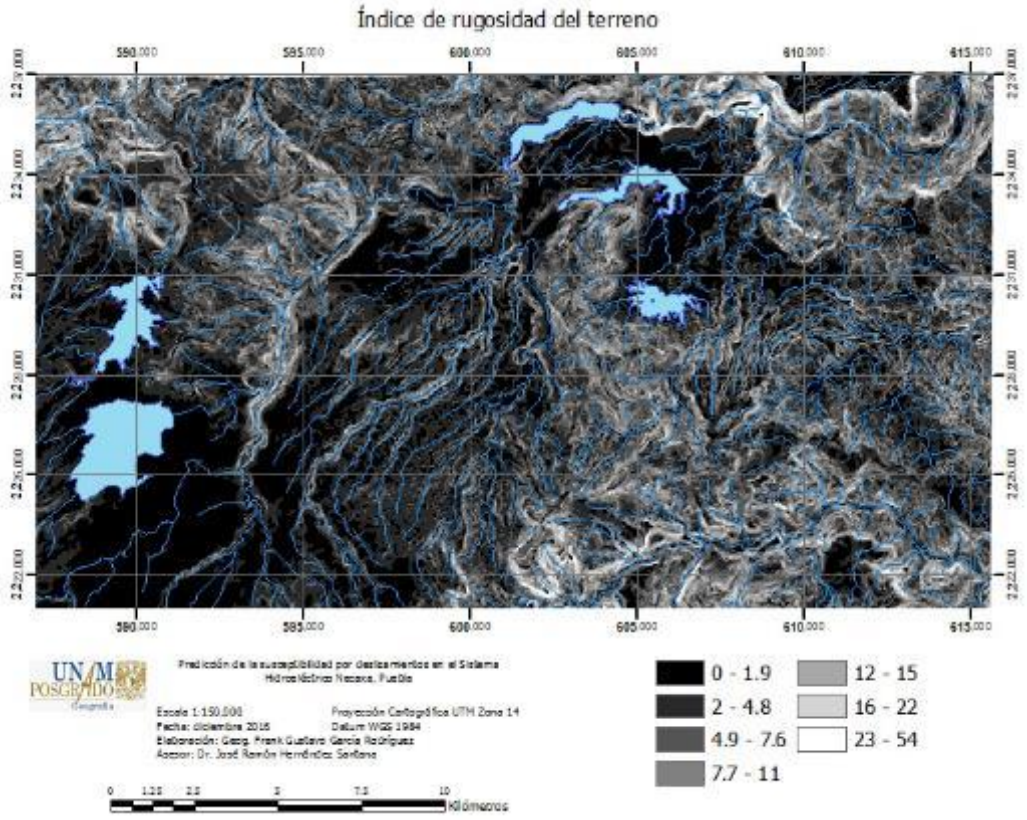

Figura 55. Índice de rugosidad del terreno.

- Rugosidad del terreno. RUG. Variación de la pendiente en un área (900 m^2), que representa la desviación de la normal a la superficie en cada pixel. Se obtuvo del MDE con el software SAGA con valores normalizados, convertidos a porcientos entre 0 y 100. El valor máximo (100) corresponde a una rugosidad nula que, al descender en la escala, aumenta la dispersión de los vectores (rugosidad alta); además, define las formas como los límites de taludes y laderas tanto en los valles como en los parteaguas[181]. También se relaciona con los deslizamientos, ya que las laderas de alta rugosidad son más propensas debido a que los cambios sucesivos de

[181] Felicísimo, Ángel M. "Aplicaciones de los Modelos Digitales del Terreno en las Ciencias Ambientales." Universidad de Oviedo, 1992.

pendiente favorecen una mayor infiltración de agua en el terreno (figura 55).

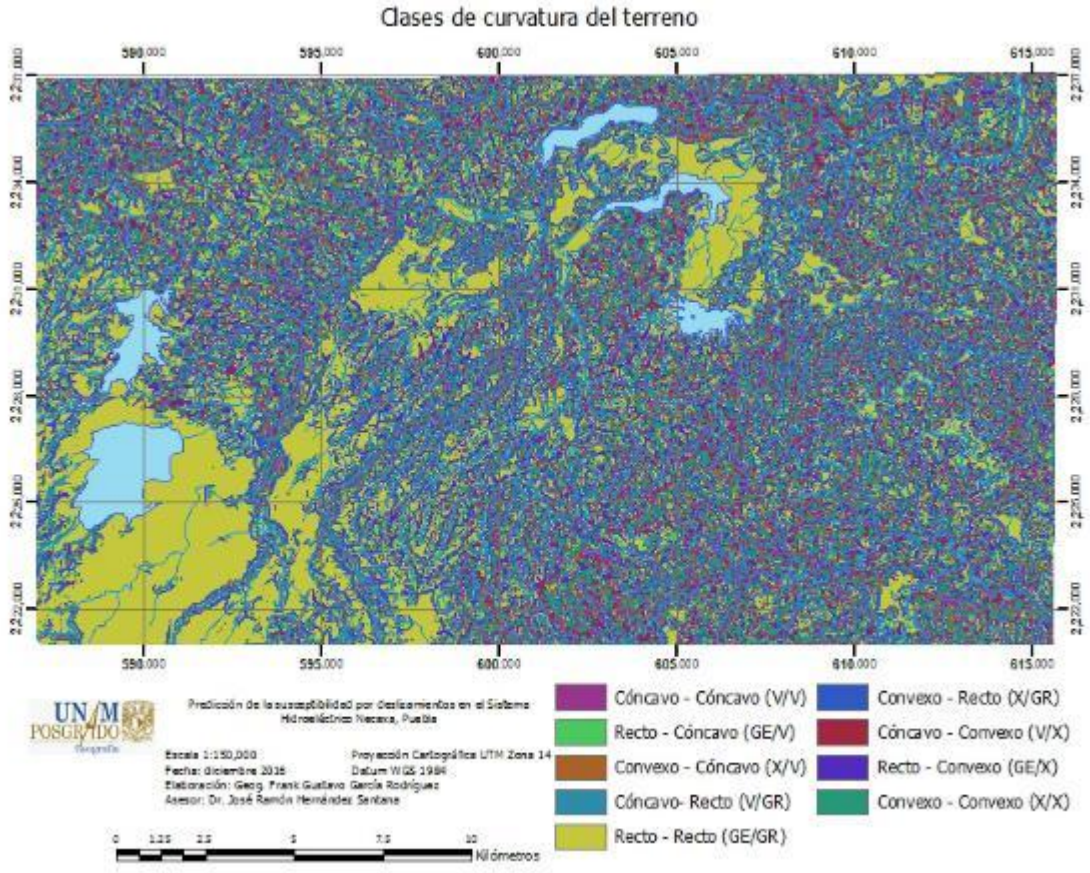

Figura 55. Índice de rugosidad del terreno.

- Curvatura de la ladera. CURV. Indica si una ladera es cóncava o convexa y se calcula mediante el radio de curvatura del pixel o celda, según el plano vertical. Se define como la tasa de cambio de la pendiente y depende de la derivada de segundo grado de la altura. Esta variable se construyó a partir del MDE con el software ArcGIS y el valor 0 de la celda, que corresponde a una superficie plana entre ésta y sus ocho celdas vecinas. Los valores positivos hacia el pixel indican que la superficie es convexa, mientras que los valores negativos señalan hacia la concavidad del mismo.

La curvatura del terreno se relaciona con los deslizamientos en la medida que indica el grado de concentración o dispersión de la escorrentía superficial. En las áreas cóncavas el flujo se concentra, mientras que en las convexas se dispersa. En las primeras, ocurre un aumento de la presión de agua en los poros y una mayor acumulación de depósitos coluviales, elementos que favorecen la aparición de flujos y derrubios. Diversos autores sugieren que los deslizamientos superficiales ocurren principalmente en convergencias topográficas donde se concentra el flujo subterráneo, tales como depresiones canalizadas y hondonadas[182],[183] (Figura 56).

- Índice topográfico de humedad. ITH. La topografía controla, en primer lugar, la variación espacial de las condiciones hidrológicas en el área y la estabilidad de las pendientes. La distribución espacial de la humedad del suelo y el flujo de agua subterránea siguen a menudo la topografía superficial, por lo que se utilizaron índices topográficos para describir los patrones espaciales de humedad del suelo como el Índice Topográfico de Humedad (Topographical Wetness Index, TWI), desarrollado por Beven & Kirkby en 1979 [184] . Se define como ITH =ln (α/tan β), donde α es igual a la ladera ascendente que drena desde cierto punto por unidad de longitud de la pendiente, y β es el ángulo de la pendiente local. El índice se calculó mediante el software SAGA.

[182] Montgomery, D. R. and Dietrich, W. E. "A physically model for the topographic control on shallow landsliding". *Water Resources Research* 30 (4) (1994): 1153-1171.
[183] Baeza, Cristina. "Evaluación de las condiciones de rotura y la movilidad de los deslizamientos superficiales mediante el uso de técnicas de análisis multivariante". Departamento de Ingeniería del Terreno y Cartográfica ETSECCPB-UPC, 1994
[184] Beven, K. J. and M. J. Kirkby. "A Physically Based, Variable Contributing Area Model of Basin Hydrology. ." *Hydrological Science Bulletin* 24, (1979): 43–69.

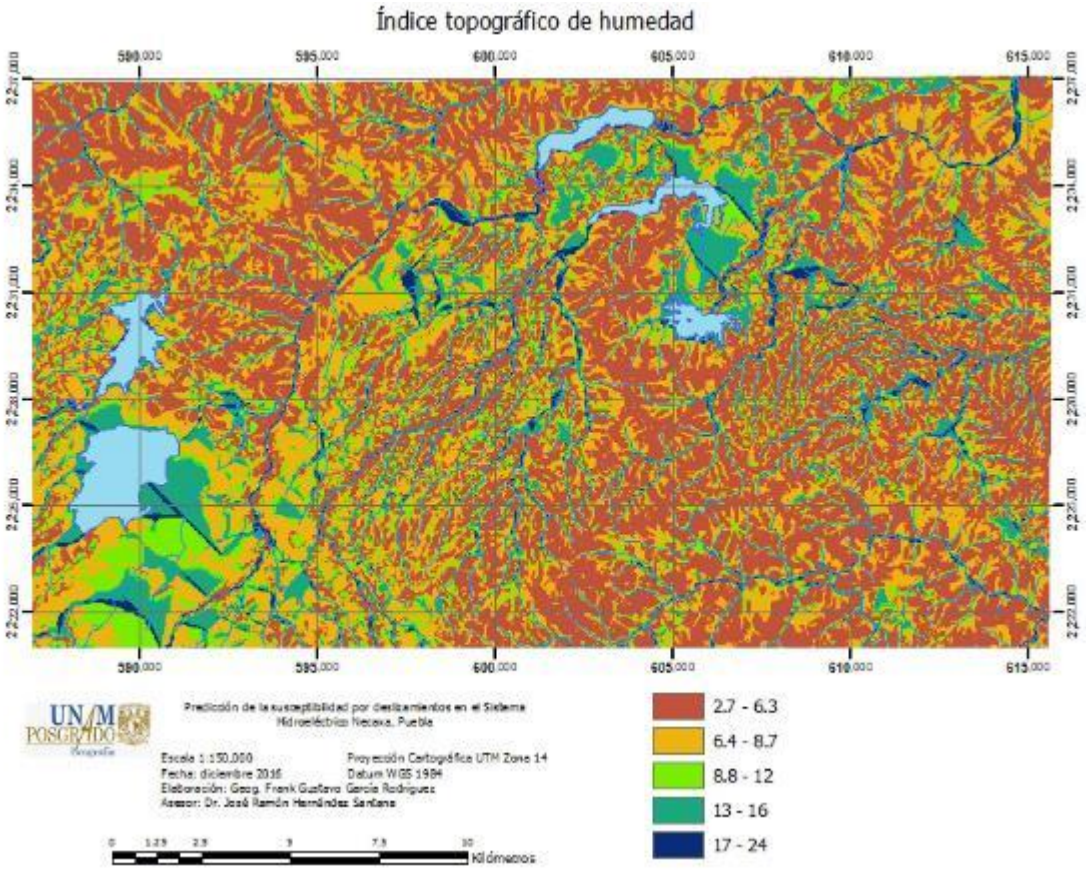

Figura 56. Índice de rugosidad del terreno.

El ITH se ha utilizado para estudiar los efectos de la escala espacial en procesos hidrológicos que provocan deslizamientos. [185] En este caso, el ITH (figura 56) se consideró como un factor predictor condicionante con valores adimensionales, más altos en las zonas de acumulación (valles fluviales) y más bajos en las zonas más altas (parteaguas).

[185] Yilmaz, Işık. "Comparison of Landslide Susceptibility Mapping Methodologies for Koyulhisar, Turkey: Conditional Probability, Logistic Regression, Artificial Neural Networks, and Support Vector Machine." *Environmental Earth Sciences* 61, no. 4 (2009): 821-836.

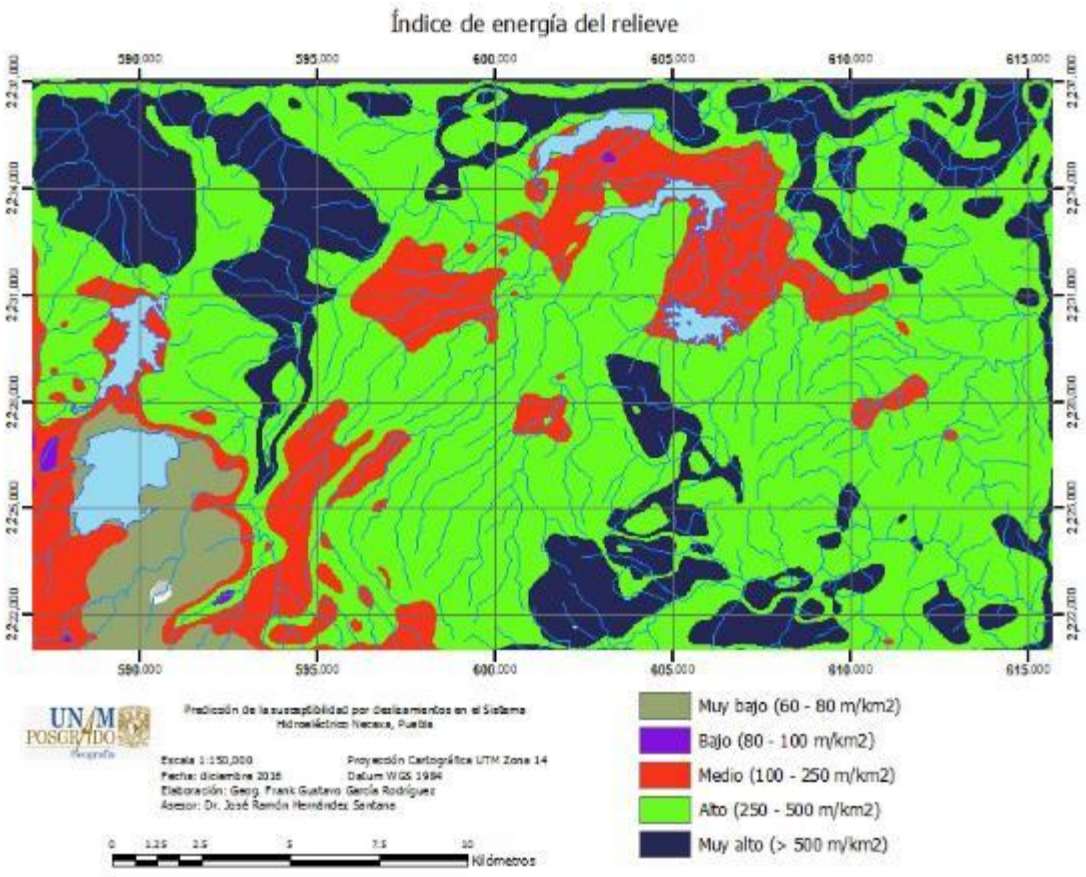

Figura 57. Índice de energía del relieve.

- Intensidad de la disección del relieve. DV. La profundidad de la disección considera la erosión en un perfil y equivale a la altura en metros, calculada entre la divisoria de las aguas y el cauce en una superficie del terreno. La unidad equivale a m/km^2. (figura 57).

- Densidad de morfoalineamientos. DM. Representa la densidad de todos los morfoalineamientos obtenidos por fotointerpretación, evidencias cartográficas y trabajos de campo. Se obtuvo por la suma total de los alineamientos entre la unidad de superficie. El resultado se expresa en km/km^2 (figura 58).

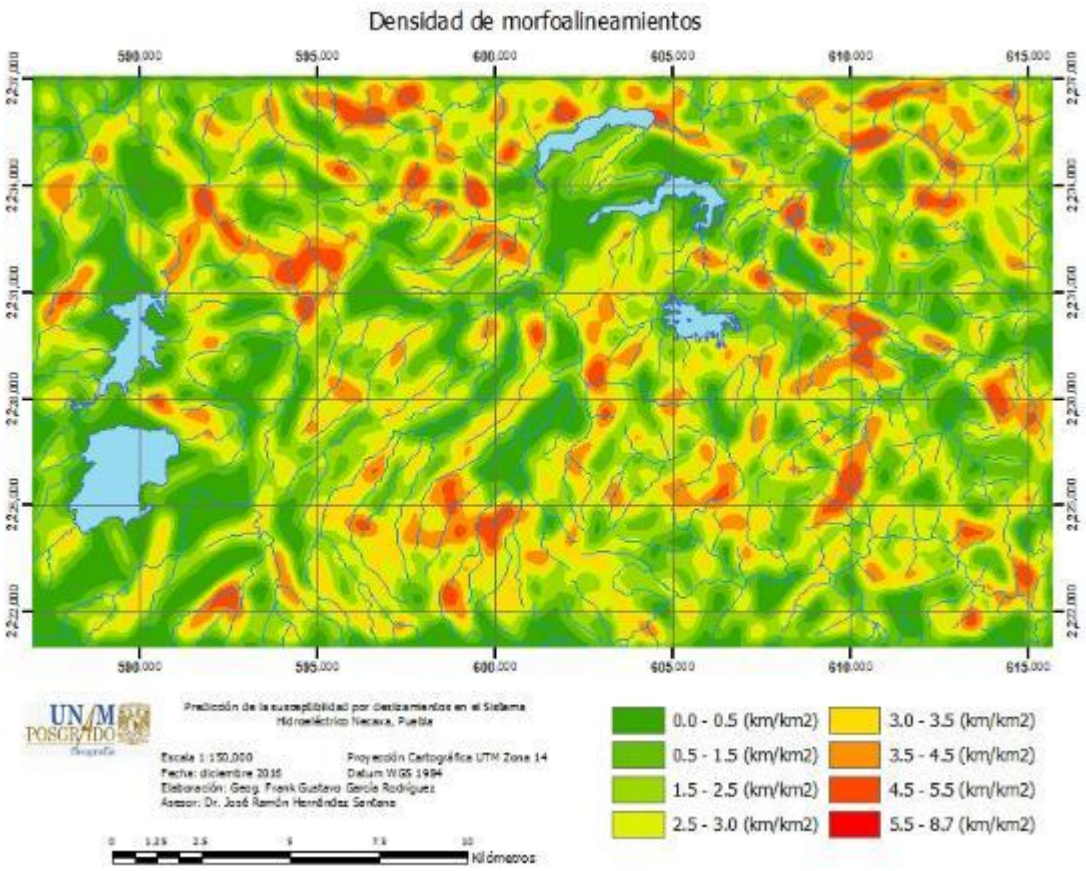

Figura 58. Densidad de morfoalineamientos.

Las variables discretas fueron las siguientes:

- Litología superficial. LIT. Representa los tipos de rocas presentes en la superficie del terreno de acuerdo a los procesos de formación universalmente reconocidos. Esta variable se obtuvo mediante revisiones bibliográficas, fotointerpretación y trabajo de campo.
- Sistema Unificado de Clasificación de Suelos. SUCS. Esta variable se construyó utilizando la clasificación de uso más común en geotecnia, propuesta por el Dr. Arturo Casagrande en 1942[186]. El sistema divide al

[186] Juárez Badillo, Eulalio and Alfonso Rico Rodríguez. *Mecánica de Suelos*. Tomo 1. 2 vols. México D. F.: Rabasa, 2004.

suelo en dos grupos: el formado por la parte gruesa y partículas mayores al tamiz No. 200 (0.074 mm) y el de la fracción fina. Esta división tiene como objetivo separar a los suelos en suelos gruesos (SG) y suelos finos (SF). La separación de arenas y gravas se da a través de la malla No. 4 (4.76 mm). Éstos se subdividen a su vez en cuatro categorías de acuerdo a la graduación de los tamaños, la presencia de finos y la plasticidad de los mismos. En este caso, la variable se construyó con mediciones realizadas en el campo y ensayos de laboratorio (figura 59). Los nombres típicos de los grupos se muestran en la tabla siguiente:

	Divisiones principales		*Símbolos del grupo*	*Nombres típicos*
SUELOS DE GRANO GRUESO Más de la mitad del material retenido en el tamiz número 200	**GRAVAS** Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por el tamiz número 4 (4.76 mm)	**Gravas limpias** (sin o con pocos finos)	**GW**	Gravas, bien graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos.
			GP	Gravas mal graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos.
		Gravas con finos (apreciable cantidad de finos)	**GM**	Gravas limosas, mezclas grava-arena-limo.
			GC	Gravas arcillosas, mezclas grava-arena-arcilla.
	ARENAS Más de la mitad de la fracción	**Arenas limpias**	**SW**	Arenas bien graduadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos.

	gruesa pasa por el tamiz número 4 (4.76 mm)	(pocos o sin finos)	**SP**	Arenas mal graduadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos.
		Arenas con finos	**SM**	Arenas limosas, mezclas de arena y limo.
		(apreciable cantidad de finos)	**SC**	Arenas arcillosas, mezclas arena-arcilla.
SUELOS DE GRANO FINO *Más de la mitad del material pasa por el tamiz número 200*	**Limos y arcillas:** Límite líquido menor de 50		**ML**	Limos inorgánicos y arenas muy finas, limos limpios, arenas finas, limosas o arcillosa, o limos arcillosos con ligera plasticidad.
			CL	Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas.
			OL	Limos orgánicos y arcillas orgánicas limosas de baja plasticidad.
	Limos y arcillas: Límite líquido mayor de 50		**MH**	Limos inorgánicos, suelos arenosos finos o limosos con mica o diatomeas, limos elásticos.
			CH	Arcillas inorgánicas de plasticidad alta.
			OH	Arcillas orgánicas de plasticidad media a elevada; limos orgánicos.
Suelos muy orgánicos			**PT**	

	Turba y otros suelos de alto contenido orgánico.

Tabla 8. Sistema de Clasificación Unificado de Suelos.

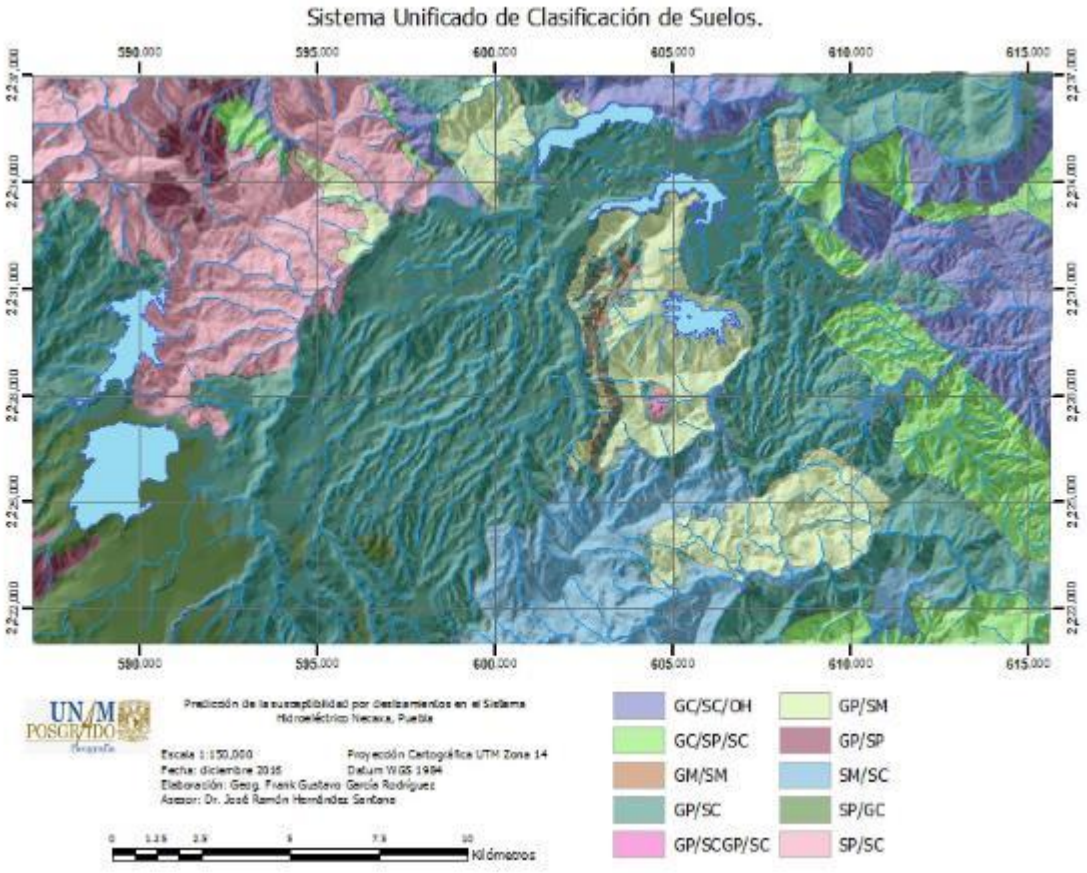

Figura 58. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

- Índice de Resistencia Geológico. GSI (*Geological Strength Index*)[187]. Es la estimación de la reducción de la resistencia de un macizo rocoso en diferentes condiciones geológicas. La caracterización del macizo rocoso es un método simple, basada en la impresión visual de la estructura rocosa, en términos de bloques y de la condición superficial de las discontinuidades indicadas por la rugosidad y alteración de las juntas. La

[187]Hoek, E. and J.W Bray. "Strengtht of rock and rock masses". *International Society for Rock Mechanics News Journal*, 2(2) (1994):4-16.

combinación de estos dos parámetros proporciona una base práctica para describir un rango amplio de tipos de macizos rocosos. La estimación se realizó en el campo utilizando la tabla mostrada en la figura 60.

Este método es utilizado para calcular los parámetros de entrada de resistencia de las rocas, es una relación empírica y, a diferencia de los sistemas RMR, Q y RMI, no se incorporan datos cuantitativos, sólo se basa en descripciones de la calidad de las rocas (figura 61).

- Coberturas del suelo. USO. La variable hace referencia a la vegetación y la cobertura vegetal que abarca al territorio. Como primer elemento diferenciador para la clasificación se utilizó la estructura fisionómica de los tipos de vegetación, los usos de suelo identificados en las ortofotos y, posteriormente, verificados durante el trabajo de campo.

  Esta fue una variable construida durante el proceso de restitución fotogramétrica y validada durante las diferentes temporadas de trabajo de campo. (figura 62)

Figura 60. Estimación del Índice de Resistencia Geológico, GSI, en base a una Descripción Geológica del Macizo Rocoso[188].

Las variables seleccionadas pretenden reflejar, de la mejor manera posible, la hipótesis del modelo de rotura descrito en el apartado anterior, pues al poseer un significado físico, pueden ser interpretadas en el análisis tanto en forma individual como en su conjunto.

[188] Hoek, E. & E. T. Brown. "Estimación de la resistencia de macizos rocosos en la práctica". *Primer Taller Geotecnico Interdivisional*, Division Chuquicamata de Codelco – Chile. La Serena, 2 - 4 de julio de 1997

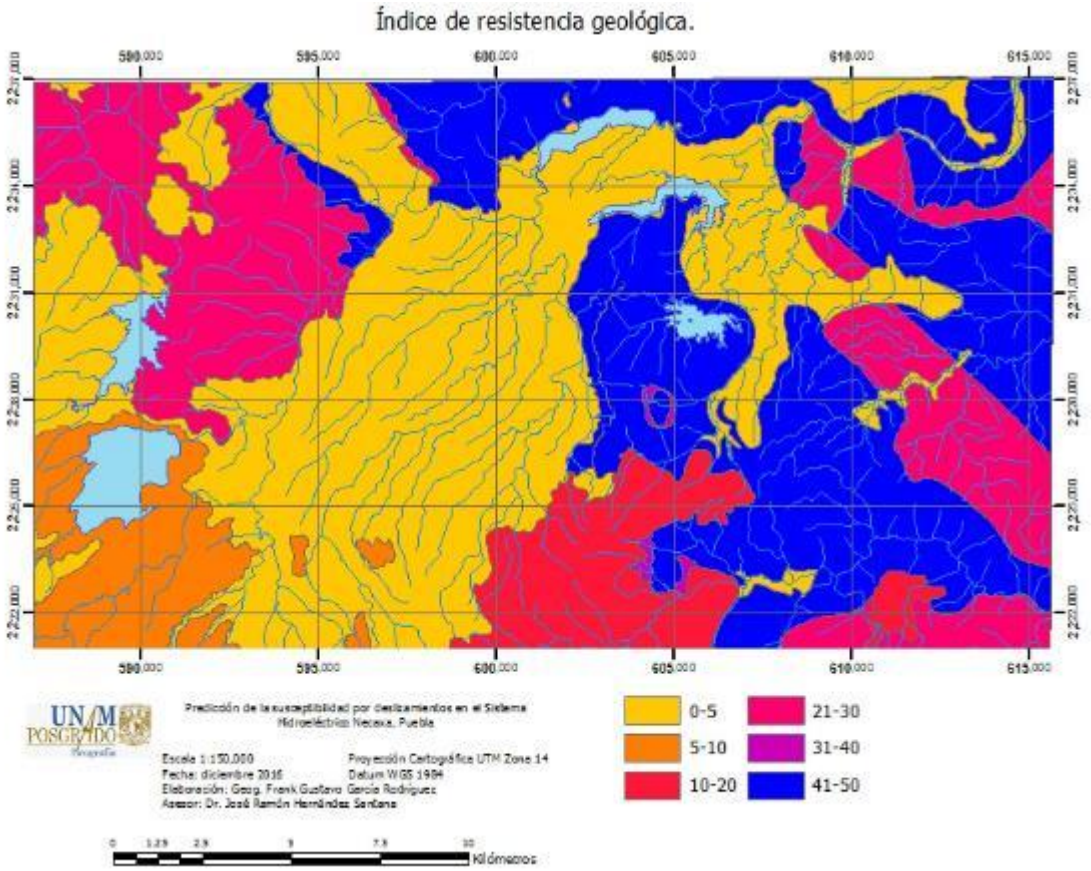

Figura 61. Índice de resistencia geológica, GSI.

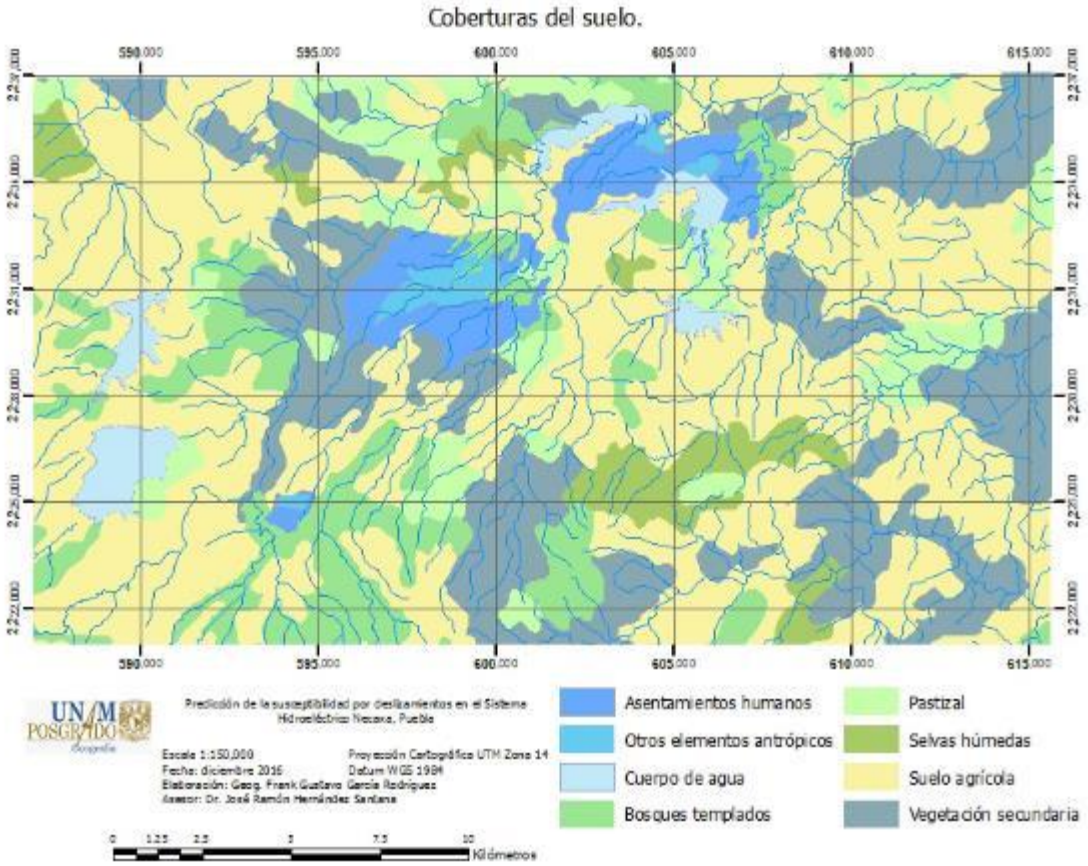

Figura 62. Coberturas del suelo.

- ✓ Elaboración del mapa geomorfológico regional.

Como se comentó en el capítulo anterior, la construcción de las unidades cartográficas se realizó utilizando el enfoque crono-morfo-genético desarrollado por Hernández-Santana y colaboradores[189], pues representa el modelo más adecuado de unidad de condición única para los riesgos geomorfológicos.

El procedimiento metodológico para la construcción de las unidades regionales geomorfológicas puede seguirse a detalle, de acuerdo con el texto antes citado. A grandes rasgos, las etapas de su construcción fueron las siguientes:

[189] Hernández Santana, José Ramón, Manuel Bollo Manent, Ana Patricia Méndez Linares and José Manuel Figueroa Mah Eng. "Formación y morfogénesis del relieve del extremo noroccidental del estado de Chiapas, México." *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, no. 68 (2009): 25-40.

a) Interpretación estereoscópica de las ortofotos a escala 1:20,000 para la delimitación y cartografía de las formas genéticas.
b) Orientación estructural del relieve mediante el mapa de sombreado analítico del relieve obtenido con el software SAGA.
c) Utilización de los mapas morfométricos seleccionados como variables (hipsometría, ángulo de inclinación de las pendientes, profundidad de disección y densidad de disección) para diferenciar cuantitativamente los parámetros geométricos del relieve. Además, se incorporaron los mapas de rugosidad del terreno y curvatura de la pendiente.
d) Análisis de las deformaciones tectónicas de las superficies de planación para revelar los espectros tectónicos de amplitud e identificación de las subcategorías del relieve.
e) Trabajo de campo: verificación de las relaciones estratigráficas del relieve y otros aspectos vinculados con la yacencia de los deslizamientos.

De acuerdo a lo anterior, se propusieron las siguientes categorías jerárquicas procesadas en el software SAGA y ArcGIS:

1) *Categorías básicas del relieve*, determinadas por las diferencias en la amplitud e intensidad de los movimientos neotectónicos (N-Q), expresadas en escalones morfestructurales de montañas, premontañas, lomeríos y sistemas de planicies;
2) *Piso altitudinal (en m) de las subcategorías del relieve* (montañas medias, bajas y premontañas; lomeríos; y planicies muy altas, altas, medianas y bajas);
3) *Tipo morfogenético específico del relieve* según su morfología, morfometría y proceso genético de formación, con indicaciones sobre su substrato geológico, así como su edad relativa;
4) *Complejo genético de formas del relieve* (tectónicas, erosivas, denudativas, fluviales, lacustres, antropogénicas y otras), mediante símbolos de acuerdo con la convención internacional.

- ✓ Elaboración de las estadísticas descriptivas de los factores condicionantes.

b. Selección, limpieza y transformación.

- ✓ Construcción de la base de datos geográfica.

La construcción de la base de datos geográfica se realizó bajo los estándares del software ArcGIS de ESRI que comprende: a) diseño conceptual, lógico y físico de los modelos de datos geográficos; b) captura mediante la restitución y digitación de los objetos en las ortofotos; c) validación mediante el tratamiento topológico de las estructuras de datos, y d) edición cartográfica final.

- ✓ Transformación de las variables (categorización y binarización) para la aplicación de modelos de funciones de favorabilidad (ff).

Como antes se explicó, las variables que condicionan la aparición de los deslizamientos son de distinta naturaleza, fundamentalmente cuantitativas o discretas y categóricas o cualitativas. Para ser tratadas matemáticamente, es preciso transformar todas ellas en valores numéricos que permitan su posterior comparación. Una solución es transformar todas las variables mediante una función que exprese la posibilidad, probabilidad o certidumbre de que la proposición inicial se cumpla. Para los efectos del presente trabajo, la estimación de esa posibilidad se realizó mediante el análisis bivariante, que consistió en mostrar las relaciones existentes entre los deslizamientos ocurridos con cada uno de los parámetros (variables). Previo a este paso se categorizaron todas las variables continuas de acuerdo a los criterios lógicos sobre el conocimiento acerca del funcionamiento de los parámetros, tal como se aprecia en la tabla.

Se obtuvieron 90 categorías de los factores condicionantes y 15 unidades geomorfológicas que fueron tratadas como variables categóricas.

El otro procedimiento de transformación fue la conversión de todas las variables en parámetros continuos mediante la transformación binaria (*booleana*), de la cual se obtuvieron 90 mapas de presencia o ausencia de cada clase de variable por tipos de movimientos gravitacional.

c. Minería de datos.

Como se menciona en el capítulo anterior, el uso de las técnicas y procedimientos de la minería de datos forma parte de la predicción de modelos fenomenológicos de los deslizamientos. Las técnicas de minería de datos permiten "entrenar" a factores múltiples predictores sin necesidad de describir matemáticamente los procesos físicos subyacentes.

Las técnicas utilizadas fueron las siguientes:

- ✓ Construcción de los modelos matemáticos de funciones de favorabilidad (ff) para las variables categóricas y las variables dicotómicas.

Los modelos probabilísticos de susceptibilidad se generaron a partir de las funciones de favorabilidad (ff), en el marco de la teoría de la probabilidad. Las variables categóricas se trataron mediante la *Índice de Frecuencias* y el *Índice de Entropía.*

El modelo de Índice Estadístico es considerado como uno de los métodos cuantitativos más simples y eficientes para cartografiar la probabilidad de susceptibilidad a los deslizamientos. Se ha utilizado con éxito en diferentes

investigaciones en Turquía[190], Vietnam[191], India[192] y noroeste de China[193], entre otros. Se define como la proporción del área donde se produjeron deslizamientos de tierra en el área total de estudio o la probabilidad de ocurrencia de un deslizamiento respecto a la no ocurrencia para un atributo dado, de acuerdo a la siguiente formula:

$$I_i = {}^{\%A \quad (k \quad 2)}\Big/_{\%A \quad (k \quad 2)} \qquad \text{Ecuación 10}$$

donde:

IF es la proporción de frecuencias para la clase *i* en el parámetro *j*. *%Ades* (km2) es el porcentaje del área de deslizamientos dentro de la clase *i* para el parámetro *j*. A*t (km2)* es el área total de la clase dentro del parámetro considerado. Un valor de relación de frecuencia igual a 1 es un valor medio para los deslizamientos dentro de la clase seleccionada. Un valor menor que 1 indica una menor probabilidad de ocurrencia de deslizamientos, mientras que un valor mayor que 1 indica una mayor probabilidad de ocurrencia de deslizamientos.

En el trabajo, los valores resultantes de cada mapa temático para el modelo de índice estadístico se calcularon en ArcGIS 10.3 y Microsoft Excel, y los resultados se muestran en la tabla no. 9.

El otro modelo estadístico utilizado fue el Índice de Entropía. Esta indica el desorden, la inestabilidad, la incertidumbre y el desequilibrio del sistema. Para el análisis de los deslizamientos, la entropía se refiere a la medida en la cual varios

[190] Yesilnacar, E. and T. Topal. "Landslide Susceptibility Mapping: A Comparison of Logistic Regression and Neural Networks Methods in a Medium Scale Study, Hendek Region (Turkey)." *Engineering Geology* 79, no. 3-4 (2005): 251-266.
[191] Long, N.T. "Landslide susceptibility mapping of the mountainous area in A Luoi district, Thua Thien Hue province, Vietnam". Faculty of Engineering, Department of Hydrology and Hydraulic Engineering, Vrije Universiteit Brussel, Belgium, (2008)
[192] Regmi, Amar Deep, Krishna Chandra Devkota, Kohki Yoshida, Biswajeet Pradhan, Hamid Reza Pourghasemi, Takashi Kumamoto and Aykut Akgun. "Application of Frequency Ratio, Statistical Index, and Weights-of-Evidence Models and Their Comparison in Landslide Susceptibility Mapping in Central Nepal Himalaya." *Arabian Journal of Geosciences* 7, no. 2 (2013): 725-742.
[193] Wang, Qiqing, Wenping Li, Yanli Wu, Yabing Pei and Peng Xie. "Application of Statistical Index and Index of Entropy Methods to Landslide Susceptibility Assessment in Gongliu (Xinjiang, China)." *Environmental Earth Sciences* 75, no. 7 (2016) DOI 10.1007/s12665-016-5400-4.

factores influyen en el desarrollo de un evento[194]. El índice se ha utilizado para calcular los pesos de las variables predictoras en trabajos realizados en distintos lugares como Eslovaquia[195] , Arabia saudita[196], Irán[197] y China[198].

Las ecuaciones para calcular el valor del peso de ponderación *Wij* son las siguientes:

$$P \quad = \frac{\%Ade\ (k\ \ 2)}{\%I\ (\mathrm{k}\ \ )} \qquad \text{Ecuación 11}$$

$$(P\ \ ) = \frac{P}{\sum_{j=1}^{S} P} \qquad \text{Ecuación 12}$$

donde:

Pij es la probabilidad y (*Pij*) es la función de densidad de probabilidades.

El valor de (*Pij*) expresa la probabilidad de que ocurra un determinado valor x*ij* y además nos indica la cantidad de información que se adquiere cuando ese valor es observado. Sí (*Pi1*) > (*Pi2*), entonces es mayor la incertidumbre sobre el evento j = j1 que sobre el evento j = j2, y también es mayor la información que se adquiere cuando éste ocurre.

$$H \quad = -\sum_{i=1}^{S}(\mathrm{Pij})\ \log_2(P\ \ ), \qquad j = 1, 2 \ldots . n \qquad \text{Ecuación 13}$$

$$H \qquad = \log_2 s\ , \qquad s\ = n\acute{u}m \qquad d\ \ c \qquad \text{Ecuación 14}$$

[194] Youssef, Ahmed M., Mohamed Al-Kathery and Biswajeet Pradhan. "Landslide Susceptibility Mapping at Al-Hasher Area, Jizan (Saudi Arabia) Using Gis-Based Frequency Ratio and Index of Entropy Models." *Geosciences Journal* 19, no. 1 (2014): 113-134.

[195] Bednarik, Martin, Barbora Magulová, Mirko Matys and Marian Marschalko. "Landslide Susceptibility Assessment of the Kraľovany–Liptovský Mikuláš Railway Case Study." Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C 35, no. 3-5 (2010): 162-171.

[196] Youssef, Ahmed M. *et all*, Ibidem. 2014.

[197] Jaafari, A., Najafi, A., Pourghasemi, H.R., Rezaeian. J., and Sattarian, A., "GIS-based frequency ratio and index of entropy models for landslide susceptibility assessment in the Caspian forest, northern Iran". *International Journal of Environmental Science and Technology*, (2013), DOI: 10.1007/s13762-013-0464-0.

[198] Wang, Qiqing et all, Ibidem. 2016

Hj y *Hjmax* son los valores de entropía y representan la cantidad media y máxima de información que recibe j.

$$I_j = \frac{H \quad -H}{H} \qquad I = (0,1) \; j = 1, 2 \ldots . n \qquad \text{Ecuación 15}$$

$$W \quad = I_j \; P \qquad \text{Ecuación 16.}$$

donde:

Ij es el coeficiente de información y Wij representa el valor del peso para el conjunto de parámetros.

En la tabla no. 9, *%At (km2)* representa el porcentaje del área total de la categoría en kilómetros cuadrados y *%Ades* (*km2*) es el porcentaje del área de la clase al interior de la categoría. Sobre la base del cálculo del valor ponderado *Wij*, se reclasificó cada mapa de factor condicionante en el orden que muestra la columna Reclas2.

Para el método del índice de frecuencia, el mapa de susceptibilidad se calculó mediante la suma simple de todos los mapas en ArcGIS 10.3. En el caso del índice de entropía, el mapa final se calculó mediante la simple adición de la multiplicación del valor ponderado de los mapas paramétricos reclasificados. La ecuación utilizada fue la siguiente[199]:

$$y = \lfloor m \quad pc \quad ét \quad 1 \; r \quad \rfloor W \quad 1 + \lfloor m \quad pc \quad ét \quad 2 \; r \quad la \rfloor W \quad 2 \ldots \ldots + n \qquad \text{Ecuación 17.}$$

donde *y* es el valor final del mapa de susceptibilidad a deslizamientos. El resultado de esta suma es un intervalo continuo de valores que representan los diversos niveles de susceptibilidad a deslizamientos.

[199] Bednarik, Martin et all. Ibidem, 2014.

- ✓ Modelo de regresión.

El algoritmo utilizado fue *Multivariate Adaptive Regression Splines* (MARS) con el software SPM tanto para el análisis de regresión como análisis de clasificación de las variables predictoras. Este es un Modelo Aditivo Generalizado o *Generalized Additive Model* (GAM) que, a diferencia de los GLM, utilizan funciones no paramétricas para cada variable predictora. En este caso fueron funciones de tipo *spline*, gracias a su mayor flexibilidad para establecer las relaciones no lineales entre predictores y respuestas.

- ✓ Modelos de clasificación y regresión.

Para el tratamiento de la clasificación se utilizaron los algoritmos *Classification and Regresion Trees* (CART), proporcionando otra alternativa no paramétrica a las técnicas de regresión utilizadas. Además, se aplicaron los módulos que contienen el algoritmo *RuleLearner* y *TreeNe*t, y que puede ser expresado como la expansión de una serie larga (de tipo Fourier o Taylor), cuyo resultado se hace más preciso a medida que la expansión continúa. Todos los algoritmos se procesaron con el software Salford Systems. La decisión de utilizar estos algoritmos en la tesis, se debe a su escaso costo computacional, la simplicidad e interpretabilidad y a la posibilidad de representarlos gráficamente.

El algoritmo CART es un árbol de decisión que representa un conjunto de restricciones o condiciones que se organizan jerárquicamente desde una raíz hasta llegar a un nodo terminal u hoja de árbol. Se representan mediante un grafo con estructura arbórea que se ha inducido desde un conjunto de datos. Los nodos internos del árbol corresponden a una condición elegida en el conjunto de atributos y, cada rama de un nodo interno, representa el valor del dominio de la condición del atributo. Cada hoja o nodo terminal contiene una etiqueta única y desde el nodo raíz

hasta una determinada hoja, la ramificación del árbol forma una regla de clasificación (figura 63).

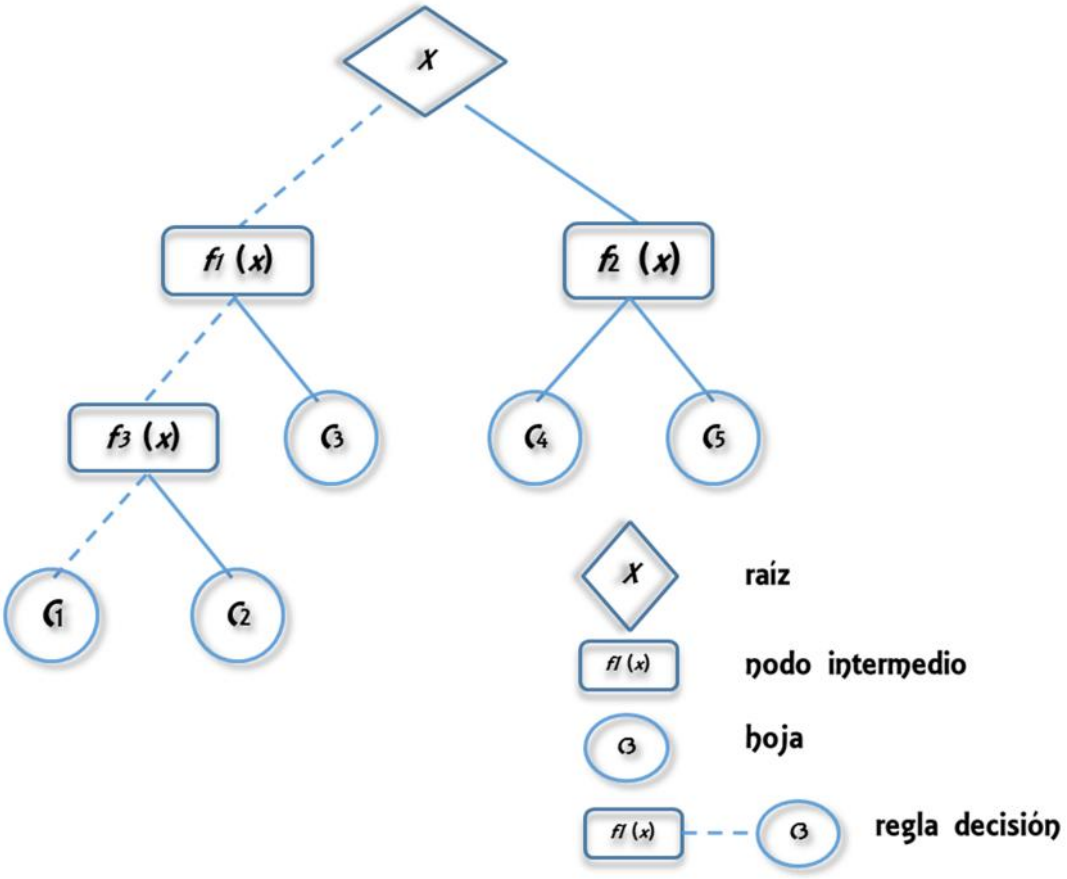

Figura 63. Esquema conceptual de un árbol de decisión.

Existen varias medidas de evaluación de cada uno de los atributos de condición que maximicen la heterogeneidad entre las clases. En nuestro trabajo, utilizamos la medida del índice Gini para evaluar las clases.

Una vez que se ha elegido la medida de evaluación, es necesario determinar la variable por la que se van a iniciar las divisiones (nodo raíz). Lo ideal sería encontrar la variable para la que todos los nodos hijos estuvieran formados por casos de una única clase. A partir del nodo raíz, el proceso de división de los datos en cada uno de los nodos internos de una regla de clasificación del árbol, se repite hasta que todos los ejemplos presenten la misma etiqueta, o se alcance una condición de

parada previamente especificada. Una vez finalizado el proceso de inducción del árbol, se aplica la poda con la intención de mejorar la capacidad de generalización mediante la reducción de su complejidad estructural. Como criterio de poda se pueden tomar factores como el número de nodos hoja, el número de nodos internos o la profundidad del árbol.

d. Evaluación e interpretación.

El objetivo de las técnicas del aprendizaje automático es el de una función objetivo *f*, considerando un espacio de posibles hipótesis *H*. Para ello, los algoritmos de aprendizaje emplean normalmente una evidencia o muestra *S* formada por ejemplos de la función objetivo *f* de acuerdo a una distribución *D*. Para entrenar y probar las hipótesis obtenidas de los modelos predictivos, los datos del inventario se dividieron en dos conjuntos: el conjunto de entrenamiento (*training set*) y el conjunto de prueba (*test set*). Esta separación se realizó para garantizar la medida independiente de la validación de los modelos.

Los métodos utilizados consistieron en:

- ✓ Validación cruzada.

En este método (*cross validation*), se dividen aleatoriamente en *n* grupos. Un grupo se reserva para el conjunto de prueba y con los otros *n-1* restantes (juntando todos los datos) se construye un modelo y se usa para predecir el resultado de los datos del grupo reservado. Este proceso se repite *n* veces, dejando cada vez un grupo diferente para la prueba. Esto significa que se calculan *n* ratios de error independientes. Finalmente se construye un modelo con todos los datos y se obtienen sus ratios de error y precisión, promediando los *n* ratios de error disponibles.[200]

[200] Hernández J., Ramírez M. J. y Ferri C. *Ibidem*. 2004.

Otra de las ventajas de la validación cruzada es que la varianza de los *k* errores de muestra parciales permite estimar la variabilidad del método de aprendizaje con respecto a la evidencia. Generalmente, se suelen utilizar 10 particiones (*10-fold cross validation*).

- ✓ Evaluación de las hipótesis basados en los costos.

Algunos autores[201] consideran el aprendizaje sensible a los costos como una generalización más realista del aprendizaje predictivo. Así, la calidad de un modelo se puede medir en términos de minimización de costos, en vez de minimización de errores.

En este caso se empleó una matriz para expresar los costos de todas las combinaciones posibles de ocurrir entre la clase predicha y la clase real. Como ellos dependen del contexto de aplicación y su variación es frecuente, se optó por la técnica de análisis denominada curvas Características Operativas del Receptor (COR) o curvas *Receiver Operating Characteristic,* (ROC). El capítulo anterior provee herramientas que permiten seleccionar el subconjunto de clasificadores que tienen un comportamiento óptimo en general.

Las curvas COR son una representación gráfica de la tasa de éxito o probabilidad para detectar correctamente un pixel cuando éste pertenece a la clase de interés. En este análisis, la presencia de deslizamientos equivale al valor 1 y la ausencia del mismo equivale al valor 0. El análisis de la curva se mueve en un umbral o criterio para detectar el pixel perteneciente a la clase de interés con el rango de valores (0,1), tal como se muestra en la siguiente figura: donde Y=0 es el área de pixeles sin deslizamiento, Y=1 es el área de pixeles con deslizamientos; NV= Negativo verdadero; PV= Positivo verdadero; NF = Negativo falso y PF = Positivo falso.

[201] Hernández J., Ramírez M. J. y Ferri C. *Ibidem*. 2004.

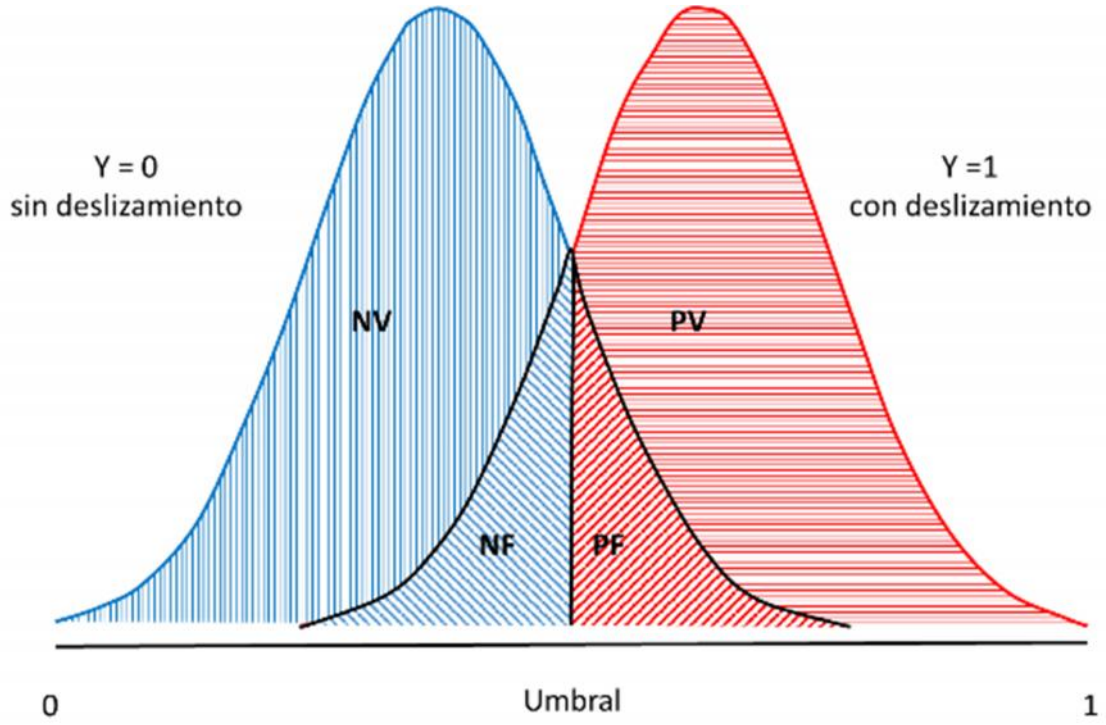

Figura 64. Distribuciones normales de los pixeles con deslizamientos y pixeles sin deslizamientos.

Los valores de especificidad (positivo falso) y sensibilidad (positivo verdadero) de la predicción son inversamente proporcionales, al incrementarse el valor de la especificidad, la sensibilidad disminuye.

V. Evaluación de los modelos y análisis de resultados.

V.1. Tipología morfogenética.

De acuerdo al basamento geológico y las características del relieve, se obtuvieron las siguientes 15 unidades (figura 65):

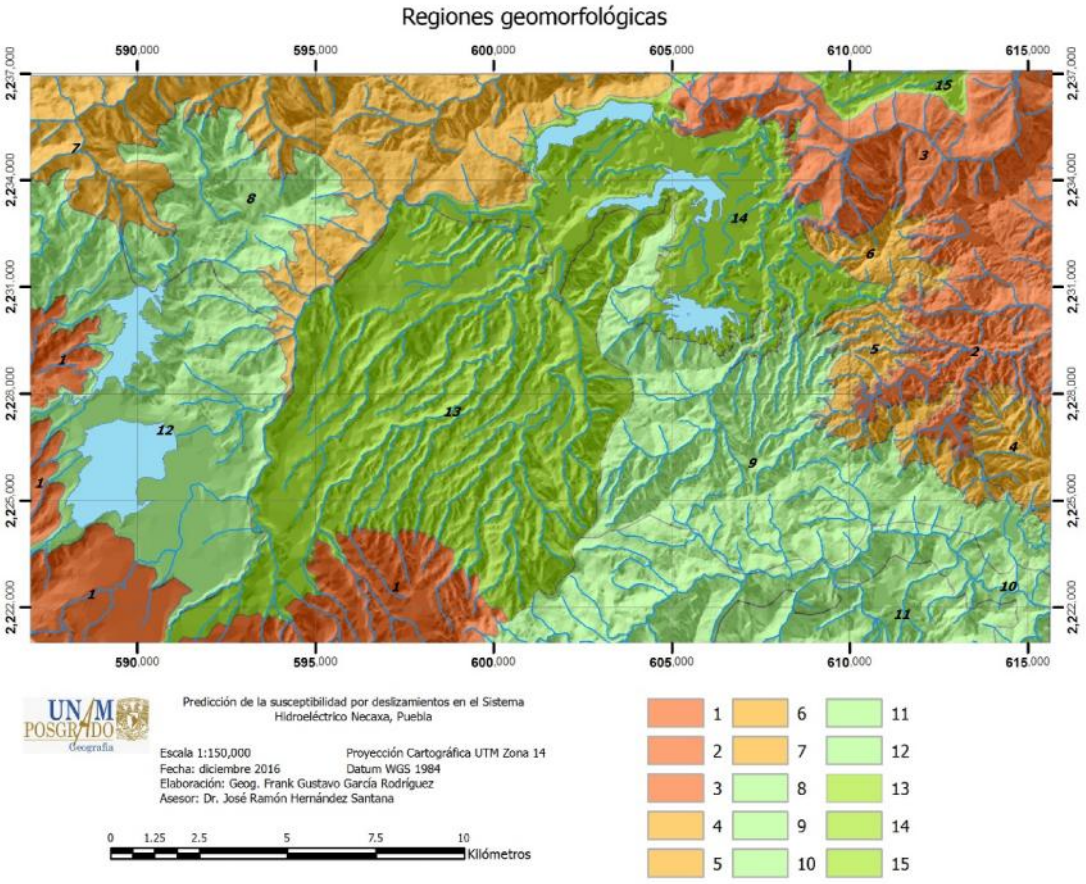

Figura 65. Regiones geomorfológicas.

I. Montañas medias a premontañas consolidadas durante el Plioceno al Cuaternario (N_2 – Q), subdivididas en doce tipos.

Las edades geomorfológicas obtenidas parten del criterio de datación relativa respecto a la litología. Los materiales terrígenos carbonatados fueron esculpidos

durante los períodos Oligoceno y Mioceno, por lo que la edad de las formas corresponde al modelado durante el Plioceno y el Cuaternario[202]. Los edificios volcánicos también surgen a finales del Terciario superior y fueron esculpidos desde su periodo de aparición hasta el reciente. Los tipos morfogenéticos se describen a continuación:

1. Montañas medias, formadas por laderas de estructuras volcánicas modeladas por mecanismos de denudación, alturas relativas de 1,200 m y disección fluvial moderada; compuestas de piroclastos disímiles provenientes de cuerpos volcánicos, pertenecientes a la provincia morfoestructural del Eje Neovolcánico. En algunos sectores es posible observar edificios volcánicos con laderas originales y escasos depósitos coluviales en sus bases (figura 66).

Las evidencias observadas en el extremo suroeste del territorio en Tepepa y Acaxochitlán, entre otros lugares, abarcan una superficie de 33.27 km^2, e indican que estas laderas de grandes edificaciones volcánicas fueron modeladas por mecanismos denudativos areales, donde poco interviene la erosión concentrada en flujos.

[202] Hernandez-Santana *et al*. Ibidem. 2009.

Figura 66. Ladera de estructura volcánica formada por materiales piroclásticos perteneciente al tipo 1. Se observan tres deslizamientos recientes. Fotografía del autor, noviembre 2016.

2. Montañas medias con superficies esculturales erosivo–denudativas cupuliformes sobre depósitos terrígenos jurásicos–cretácicos y aislada cobertura de depósitos piroclásticos pliocénicos–cuaternarios, alturas relativas de 1,200 m, medianamente diseccionadas.

3. Montañas medias con superficies esculturales denudativas–erosivas sobre depósitos carbonatados terrígenos (calizas, limonitas y lutitas) jurásico–cretácicos y alturas relativas de 1,200 m, profundamente diseccionadas. Una característica son las superficies de afloramientos calcáreos en las cumbres basculadas. En este tipo dominan estructuras disyuntivas de bloques a diferentes niveles, intercalados por valles fluviales profundos (más de 400 m) con escarpes muy pronunciados, asociados a fallas o fosas tectónicas. Se observa en Xaltepuxtla, Xochinanacatlán y Patla, y posee una superficie de 42.53 km^2. Su rasgo morfotectónico fundamental son las fallas de tipo inverso o cabalgaduras (figuras 68 y 69).

Figura 67. Estructura cupuliforme formada sobre lutitas y calizas de la formación Pimienta, perteneciente al tipo 2. Fotografía del autor, noviembre 2016.

4. Montañas bajas con superficies esculturales erosivo–denudativas sobre depósitos terrígenos jurásicos–cretácicos y aislada cobertura de depósitos piroclásticos pliocénicos–cuaternarios, alturas relativas de 600 m y profundamente diseccionadas. Aflora al sur del tipo 2 y se diferencia por la altura relativa y la intensidad de los procesos fluviales, manifestándose en la red de barrancas, en una superficie de 6.23 km^2.

Figura 68. Montañas medias denudativas erosivas esculpidas sobre depósitos carbonatados terrígenos, basculadas (tipo 3). Fotografía del autor, noviembre 2016.

Figura 69. Montañas medias denudativas erosivas esculpidas sobre depósitos carbonatados terrígenos, basculadas (tipo 3). Fotografía del autor, noviembre 2016.

5. Montañas bajas con superficies esculturales erosivo–kársticas sobre secuencias litológicas del cretácico inferior (margas, areniscas y calizas), alturas relativas de 600 m y disección moderada. La karstificación aflora en la parte superior de los edificios como crestas estructurales, dominando procesos kársticos sufosivos, en una superficie de 10.96 km^2.

6. Montañas bajas con superficies esculturales denudativas–erosivas sobre depósitos carbonatados terrígenos (calizas, limonitas y lutitas) jurásicos–cretácicos, algunas cortezas de intemperismo, alturas relativas de 600 m y medianamente diseccionadas. Aparece al suroeste de Xaltepuxtla (tipo 3), diferenciándose por la altura relativa y la intensidad de los procesos erosivos fluviales. Posee una superficie estimada de 4.42 km^2 (figura 70).

Figura 70. Montañas bajas denudativas erosivas esculpidas sobre depósitos carbonatados terrígenos, basculadas (tipo 6). Fotografía del autor, noviembre 2016.

7. Montañas bajas con superficies esculturales kársticos–denudativas, formadas sobre calizas, lutitas, limonitas y margas de edad jurásicas y

cretácicas, con restos areales mesiformes y parteaguas principales rectilíneos controlados por estructuras plicativas, alturas relativas de 600 m y moderada disección fluvial. (***) Representa uno de los sectores montañosos más extensos: 50.76 km^2 en el nororiente del territorio, con la litología más antigua, integrando un grupo de bloques orientados NW-SE, con elementos estructurales de plegamientos que determinan la distribución de las formas más representativas del relieve, tales como laderas escarpadas, parteaguas kársticos–denudativos mesiformes y algunos niveles cumbrales mogotiformes (figura 71).

Figura 71. Montañas bajas kárstico denudativas esculpidas sobre depósitos carbonatados terrígenos (tipo 7). Fotografía del autor, noviembre 2016.

8. Premontañas con superficies esculturales kársticos–denudativas, formadas sobre limonitas, areniscas y conglomerados jurásicas con restos areales

mesiformes y parteaguas principales rectilíneos controlados por estructuras plicativas, alturas relativas de 300 m e intensa disección fluvial. (***) Se diferencia del tipo anterior por la composición litológica, la altitud relativa y la disección vertical del relieve. Posee una extensión superficial de 20.34 km^2.

9. Premontañas con superficies esculturales kársticos–erosivas, formadas dominantemente en calizas arrecifales del cretácico inferior con intercalaciones extensas de superficies tobaceas piroclásticas de composición variada, niveles cumbrales cupuliformes y parteaguas lineales kársticos–denudativos, alturas relativas de 300 m y profundamente diseccionadas.

Figura 72. Premontañas kárstico erosivas esculpidas sobre calizas arrecifales (tipo 9). Fotografía del autor, noviembre 2016.

10. Premontañas con superficies esculturales kársticos–denudativas formadas sobre lutitas y limolitas jurásicas e intercalaciones de materiales

piroclásticos, cumbres cupuliformes con estructuras anulares o semicirculares moderadamente diseccionadas y alturas relativas de 600 m y superficie de 27.46 km^2. El límite sur es una litomorfoestructura semicircular

11. Premontañas con superficies esculturales kársticos–denudativas formadas sobre lutitas y limolitas jurásicas y calizas cretácicas e intercalaciones de dacitas y riolitas, cumbres cupuliformes semicirculares, moderadamente diseccionadas y alturas relativas de 600 m, y una superficie de 11.83 km^2.

12. Premontañas con superficies esculturales erosivos–denudativas, superficies escalonadas sobre calizas, limonitas, areniscas y conglomerados miocénicos, alturas relativas de 600 m y superficies antrópicas, sobre depósitos cuaternarios, ligeramente diseccionadas. Posee una extensión de 51.90 km^2, y lugar de asiento de las presas Los Reyes y La Laguna. (figura 73).

II. Planicies consolidadas durante el Cuaternario (Q); se subdividen en tres tipos:

13. Planicies colinosas estructuro–denudativas con superficies esculturales denudativo–erosivas, litomorfoestructuras circulares, colinosas, escalonadas; fuertemente diseccionadas sobre depósitos piroclásticos de composición ácida a intermedia y depósitos aluviales diferenciados. Constituye la planicie más extendida en el territorio (89.19 km2), desmembrada y cuyo rasgo geomorfológico característico es la red de barrancos controlados por litomorfoestructuras semicirculares. Posee un grado de intervención antrópica muy intenso con usos de suelos agrícolas y urbanos.

Figura 73. Premontañas erosivo denudativas sobre calizas, areniscas y conglomerados (tipo 12). En primer plano se observa parte de la llanura antrópica de la presa Los Reyes. Fotografía del autor, agosto 2009.

14. Planicies colinosas estructuro–denudativas con litomorfoestructuras circulares, colinosas, ligeramente diseccionadas sobre depósitos piroclásticos de composición ácida a intermedia y depósitos aluviales diferenciados. Se distingue de la anterior por constituir una llanura con muy alto nivel de artificialidad antrópica. Posee una superficie de 42.39 km^2, donde se localizan varios centros urbanos y tres presas: Necaxa, Tenango y Nexapa (figura 74).

Figura 75. Planicie colinosa estructuro denudativa, con litomorfoestructuras circulares en segundo plano (tipo 13). En primer plano, la Central Hidroeléctrica de Tepexi. Fotografía del autor, agosto 2009.

15. Planicie mesiforme con superficie escultural estructuro–denudativa plana, con nula disección vertical, formada por derrames basálticos columnares en mantos que cubrieron las partes altas, al noreste del territorio, ocupando una superficie de 3.97 km^2.

V.2. Modelos estadísticos.

- ✓ Aplicación del Índice de Frecuencias y el mapa de susceptibilidad a deslizamientos.

Para el tratamiento de los datos se construyó una matriz formada por 724 eventos (deslizamientos y flujos) y 13 variables (**Anexo 1**). Cada factor condicionante se convirtió en una variable categórica, eliminando aquellas variables sin información, tal como se muestra en la siguiente tabla.

Nombre de la clase	Nombre de las categorías	Clave Categoría
Complejo de categorías del relieve	Planicies mesiformes (20 m < H < 40 m)	REL1
	Planicies colinosas (40 m < H < 120 m)	REL2
	Premontañas (300 m < H < 600 m)	REL3
	Montañas bajas (600 m < H < 1,200 m)	REL4
	Montañas medias (1,200 m< H < 2,520 m)	REL5
Complejo de pendientes	Suavemente inclinada (0° - 6°)	PEND1
	Medianamente inclinada (6° - 8°)	PEND2
	Muy inclinada (8° - 10°)	PEND3
	Medianamente escarpada (10° - 15°)	PEND4
	Escarpada (15° - 30°)	PEND5
	Muy escarpada (30° - 45°)	PEND6
	Abrupta (> 45°)	PEND7
Clases de orientación de laderas	Norte (0° - 22.5°)	ORI1
	Noreste (22.5° - 67.5°)	ORI2
	Este (67.5° - 112.5°)	ORI3
	Sureste (112.5° - 157.5°)	ORI4
	Sur (157.5° - 202.5°)	ORI5
	Suroeste (202.5° - 247.5°)	ORI6
	Oeste (247.5° - 292.5°)	ORI7
	Noroeste (292.5° - 337.5°)	ORI8
	Norte (337.5° - 359.5°)	ORI9
Índice de rugosidad (%)	0 -1.89	RUG1
	1.89 - 4.83	RUG2
	4.83 -7.57	RUG3
	7.57 -10.51	RUG4
	10.51 -14.51	RUG5
	14.51 - 21.67	RUG6
	21.67 - 53.65	RUG7
Clases de curvaturas de laderas	Cóncavo - Cóncavo (V/V)	CUR1
	Recto - Cóncavo (GE/V)	CUR2
	Convexo - Cóncavo (X/V)	CUR3
	Cóncavo- Recto (V/GR)	CUR4
	Recto - Recto (GE/GR)	CUR5

	Convexo - Recto (X/GR)	CUR6
	Cóncavo - Convexo (V/X)	CUR7
	Recto - Convexo (GE/X)	CUR8
	Convexo - Convexo (X/X)	CUR9
Índice topográfico de humedad	2.65 - 6.25	ITH1
	6.25 - 8.70	ITH2
	8.70 - 11.90	ITH3
	11.90 - 15.83	ITH4
	15.83 - 23.52	ITH5
Energía del relieve (m/km2)	100 - 250	DV3
	250 - 500	DV4
	> 500	DV5
Den. de morfoalineamientos (km/km2)	0.0 - 0.5	DEN1
	0.5 - 1.5	DEN2
	1.5 - 2.5	DEN3
	2.5 - 3.0	DEN4
	3.0 - 3.5	DEN5
	3.5 - 4.5	DEN6
	4.5 - 5.5	DEN7
Litología superficial	Huayacocotla (Lu-Lm-Cgp)	LIT1
	Cahuasas (Lm-Ar-Cgp)	LIT2
	Santiago/Tepexi/Tamán/Pimienta (Cz-Lu-Lm)	LIT3
	Tamaulipas inferior/Agua Nueva (Cz -Lu)	LIT4
	San Felipe (Lu – Cz)	LIT5
	Méndez (Lu – Mg)	LIT6
	Basaltos / Andesitas	LIT7
	Dacitas / Riolitas	LIT8
	Depósitos aluviales	LIT10
GSI	0 - 5	GSI1
	10 - 20	GSI3
	20 - 30	GSI4
	30 - 40	GSI5
	40 - 50	GSI6
SUCS	GC/SP/SC	SUCS2
	SM/SC	SUCS3
	GP/SC	SUCS4
	GP/SP	SUCS5
	GP/SM	SUCS6
	GM/SM	SUCS8
	GC/SC/OH	SUCS9
	SP/SC	SUCS10

Cobertura de suelo	Selva húmeda	COB1
	Bosques templados	COB2
	Suelo agrícola	COB3
	Asentamientos humanos	COB5
	Pastizales	COB6
	Vegetación secundaria	COB7
	Otros elementos antrópicos	COB8
Tipología geomorfológica	Tipo 1	TIP1
	Tipo 2	TIP2
	Tipo 3	TIP3
	Tipo 4	TIP4
	Tipo 5	TIP5
	Tipo 6	TIP6
	Tipo 7	TIP7
	Tipo 8	TIP8
	Tipo 9	TIP9
	Tipo 10	TIP10
	Tipo 11	TIP11
	Tipo 12	TIP12
	Tipo 13	TIP13
	Tipo 14	TIP14
	Tipo 15	TIP15

Tabla 9. Categorías de los factores predictores.

El primer modelo estadístico calculado fue el modelo del Índice de Frecuencia. La siguiente tabla muestra las relaciones espaciales entre los factores condicionantes y los deslizamientos, utilizando los modelos estadísticos Índice de frecuencia y el Índice de entropía.

Nombre de la clase	Nombre de las categorías	%At (km2)	%Ades (km2)	*IF*	*(Pij)*	*Hj*	*Hjmax*	*Ij*	*Wij*
Complejo de categorías del relieve	Planicies mesiformes (20 m < H < 40 m)	10.43	4.88	0.4679	0.0895	2.0342	2.3219	0.1239	0.024761
	Planicies colinosas (40 m < H < 120 m)	19.17	9.40	0.4905	0.0938				
	Premontañas (300 m < H < 600 m)	34.52	18.99	0.5503	0.1052				
	Montañas bajas (600 m < H < 1,200 m)	16.28	29.51	1.8126	0.3466				
	Montañas medias (1,200 m< H < 2,520 m)	19.61	37.33	1.9040	0.3640				
Complejo de pendientes	Suavemente inclinada (0° - 6°)	24.41	6.17	0.2528	0.0340	2.3740	2.8073	0.1544	0.022061

	Medianamente inclinada (6° - 8°)	4.75	1.82	0.3825	0.0515				
	Muy inclinada (8° - 10°)	4.86	1.46	0.3001	0.0404				
	Medianamente escarpada (10° - 15°)	12.92	10.25	0.7932	0.1068				
	Escarpada (15° - 30°)	36.29	44.09	1.2151	0.1635				
	Muy escarpada (30° - 45°)	14.63	26.85	1.8360	0.2471				
	Abrupta (> 45°)	2.11	5.60	2.6532	0.3571				
Clases de orientación de laderas	Plano	0.13	0.00	0.0000	0.0000	3.1595	3.3219	0.0489	0.004891
	Norte (0° - 22.5°)	5.61	5.56	0.9902	0.1089				
	Noreste (22.5° - 67.5°)	11.38	11.22	0.9856	0.1084				
	Este (67.5° - 112.5°)	12.15	12.46	1.0257	0.1128				
	Sureste (112.5° - 157.5°)	13.23	10.73	0.8110	0.0892				
	Sur (157.5° - 202.5°)	11.80	10.06	0.8521	0.0937				
	Suroeste (202.5° - 247.5°)	12.68	14.43	1.1380	0.1252				
	Oeste (247.5° - 292.5°)	13.60	15.87	1.1665	0.1283				
	Noroeste (292.5° - 337.5°)	13.41	12.85	0.9580	0.1054				
	Norte (337.5° - 359.5°)	5.96	6.95	1.1655	0.1282				
Índice de rugosidad (%)	0 -1.89	24.63	5.50	0.2232	0.0173	2.4642	2.8073	0.1222	0.017291
	1.89 - 4.83	27.72	19.33	0.6975	0.0541				
	4.83 -7.57	23.24	29.58	1.2729	0.0987				
	7.57 -10.51	14.49	22.46	1.5501	0.1202				
	10.51 -14.51	7.29	14.49	1.9869	0.1540				
	14.51 - 21.67	2.20	7.88	3.5845	0.2779				
	21.67 - 53.65	0.33	1.12	3.4117	0.2681				
Clases de curvaturas de laderas	Cóncavo - Cóncavo (V/V)	13.23	17.98	1.3593	0.1366	3.0990	3.1699	0.0224	0.002486
	Recto - Cóncavo (GE/V)	7.82	10.88	1.3907	0.1398				
	Convexo - Cóncavo (X/V)	4.48	4.96	1.1089	0.1115				
	Cóncavo- Recto (V/GR)	12.76	13.82	1.0826	0.1088				
	Recto - Recto (GE/GR)	23.05	10.88	0.4721	0.0474				
	Convexo - Recto (X/GR)	10.67	6.85	0.6413	0.0644				
	Cóncavo - Convexo (V/X)	5.67	8.75	1.5418	0.1550				
	Recto - Convexo (GE/X)	8.83	10.73	1.2156	0.1222				
	Convexo - Convexo (X/X)	13.41	15.27	1.1394	0.1145				
Índice topográfico de humedad	2.65 - 6.25	46.17	50.32	1.0900	0.2517	2.2813	2.3219	0.0175	0.003652
	6.25 - 8.70	28.84	31.69	1.0988	0.2538				
	8.70 - 11.90	13.00	11.03	0.8484	0.1959				
	11.90 - 15.83	8.93	5.16	0.5781	0.1335				
	15.83 - 23.52	2.94	2.11	0.7174	0.1657				
Energía del relieve (m/km2)	60 - 80	4.04	0.00	0.0000	0.0000	1.0237	2.3219	0.5591	0.111777
	80 - 100	0.17	0.00	0.0000	0.0000				

	100 - 250	15.56	2.18	0.1398	0.0429				
	250 - 500	57.31	43.69	0.7624	0.2339				
	> 500	23.02	54.25	2.3565	0.7228				
Den. de morfoalineamientos (km/km2)	0.0 - 0.5	16.19	10.99	0.6786	0.0922	2.7590	3.000	0.0803	0.010043
	0.5 - 1.5	18.87	15.08	0.7996	0.1086				
	1.5 - 2.5	21.26	20.79	0.9780	0.1329				
	2.5 - 3.0	18.32	17.64	0.9628	0.1308				
	3.0 - 3.5	14.96	21.91	1.4646	0.1990				
	3.5 - 4.5	7.72	11.01	1.4253	0.1937				
	4.5 - 5.5	2.57	2.70	1.0517	0.1429				
	5.5 - 8.7	0.00	0.00	0.0000	0.0000				
Litología superficial	Huayacocotla (Lu-Lm-Cgp)	2.25	1.08	0.4797	0.0534	2.9160	3.3219	0.1222	0.012224
	Cahuasas (Lm-Ar-Cgp)	10.06	24.51	2.4371	0.2714				
	Santiago/Tepexi/Tamán/Pimienta (Cz-Lu-Lm)	27.34	44.94	1.6436	0.1830				
	Tamaulipas inferior/Agua Nueva (Cz -Lu)	10.14	8.79	0.8669	0.0965				
	San Felipe (Lu – Cz)	0.36	0.44	1.2303	0.1370				
	Méndez (Lu – Mg)	0.41	0.21	0.5095	0.0567				
	Basaltos / Andesitas	34.55	14.09	0.4079	0.0454				
	Dacitas / Riolitas	6.86	4.54	0.6620	0.0737				
	Piroclastos	5.96	0.00	0.0000	0.0000				
	Depósitos aluviales	2.04	1.52	0.7461	0.0831				
GSI	0 - 5	37.92	16.90	0.4457	0.0777	2.1702	2.5849	0.1605	0.026752
	5 - 10	7.25	0.00	0.0000	0.0000				
	10 - 20	6.86	4.54	0.6620	0.1153				
	20 - 30	19.14	30.85	1.6115	0.2808				
	30 - 40	0.26	0.36	1.3593	0.2368				
	40 - 50	28.53	47.47	1.6637	0.2898				
SUCS	SP/GC	5.96	0.00	0.0000	0.0000	2.6462	3.3219	0.2034	0.020340
	GC/SP/SC	8.81	15.73	1.7847	0.1424				
	SM/SC	7.98	5.49	0.6887	0.0550				
	GP/SC	44.38	22.35	0.5037	0.0402				
	GP/SP	1.75	5.47	3.1260	0.2495				
	GP/SM	9.92	31.90	3.2152	0.2566				
	GP/SCGP/SC	0.04	0.00	0.0000	0.0000				
	GM/SM	0.36	0.44	1.2310	0.0982				
	GC/SC/OH	8.45	14.98	1.7719	0.1414				
	SP/SC	12.30	2.56	0.2080	0.0166				
Cobertura de suelo	Selva húmeda	4.45	8.28	1.8606	0.1514	2.3692	3.000	0.2103	0.026278
	Bosques templados	11.29	9.93	0.8792	0.0715				
	Suelo agrícola	49.52	51.81	1.0461	0.0851				
	Cuerpos de agua	0.30	0.00	0.0000	0.0000				

	Asentamientos humanos	4.59	18.42	4.0130	0.3265				
	Pastizales	8.10	6.85	0.8454	0.0688				
	Vegetación secundaria	20.73	2.87	0.1385	0.0113				
	Otros elementos antrópicos	1.00	3.52	3.5048	0.2852				

Tabla 10. Relaciones entre los factores condicionantes y los deslizamientos mediante el Índice de Frecuencia y el Índice de Entropía.

En los gráficos siguientes se puede constatar el comportamiento de los factores condicionantes, de acuerdo al modelo del Índice de Frecuencia. En la figura 75 A las variables montañas bajas y montañas poseen los niveles más altos, mientras que las laderas escarpadas a las abruptas tienen mayores probabilidades de rupturas por deslizamientos. Sin embargo, en las categorías definidas por la variable orientación de las laderas (figura 76 C) no existe una preferencia marcada en la relación de frecuencias para una orientación en particular. En el caso del índice de rugosidad (figura 76 D), las frecuencias más altas están asociadas a los valores superiores.

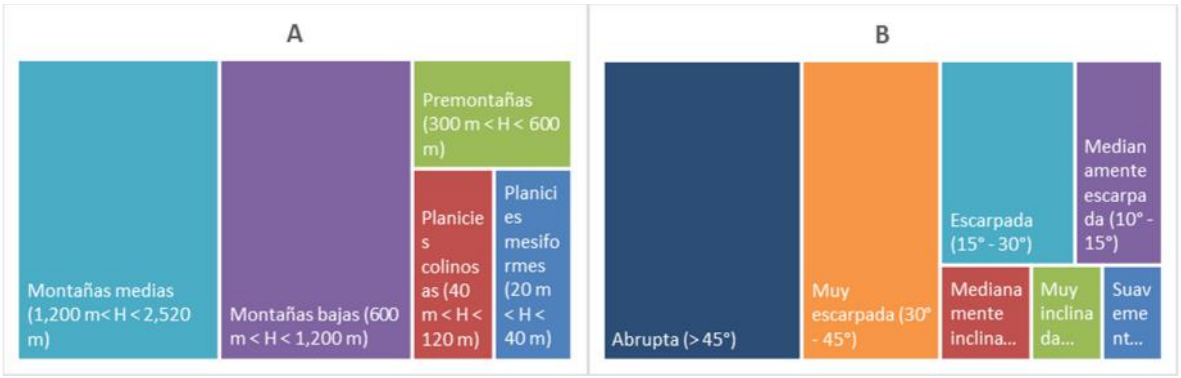

Figura 75. Análisis bivariado del comportamiento de las probabilidades obtenidas mediante el Índice de Frecuencia. A, deslizamientos versus complejos de categorías del relieve. B, deslizamientos versus complejo de categorías de pendientes.

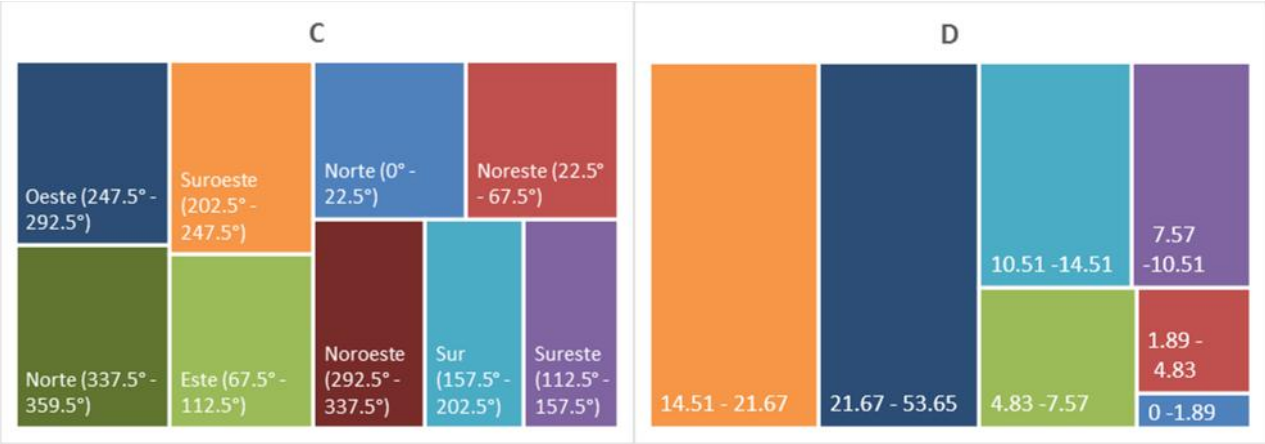

Figura 76. Análisis bivariado del comportamiento de las probabilidades obtenidas mediante el Índice de Frecuencia. C, deslizamientos versus clases de orientación de laderas. D, deslizamientos versus índice de rugosidad.

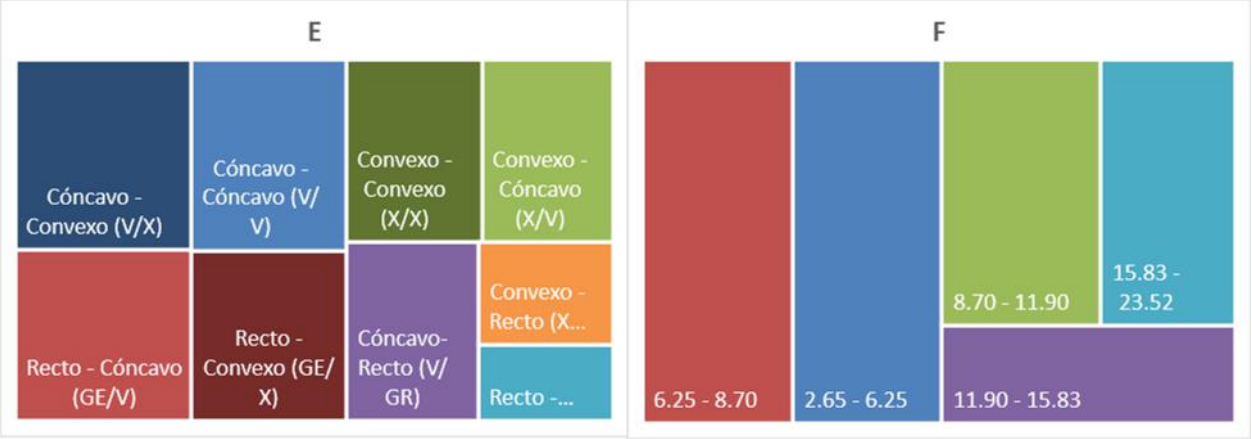

Figura 77. Análisis bivariado del comportamiento de las probabilidades obtenidas mediante el Índice de Frecuencia. E, deslizamientos versus clases de curvatura de laderas. F, deslizamientos versus índice topográfico de humedad.

El IF de las clases de curvatura de laderas muestra una distribución acorde a lo esperado, con valores más altos en la familia de curvaturas cóncavas. El valor del ITH es mayor en aquellos lugares donde se acumulan depósitos coluviales, asociados a laderas de tipo cóncavo.

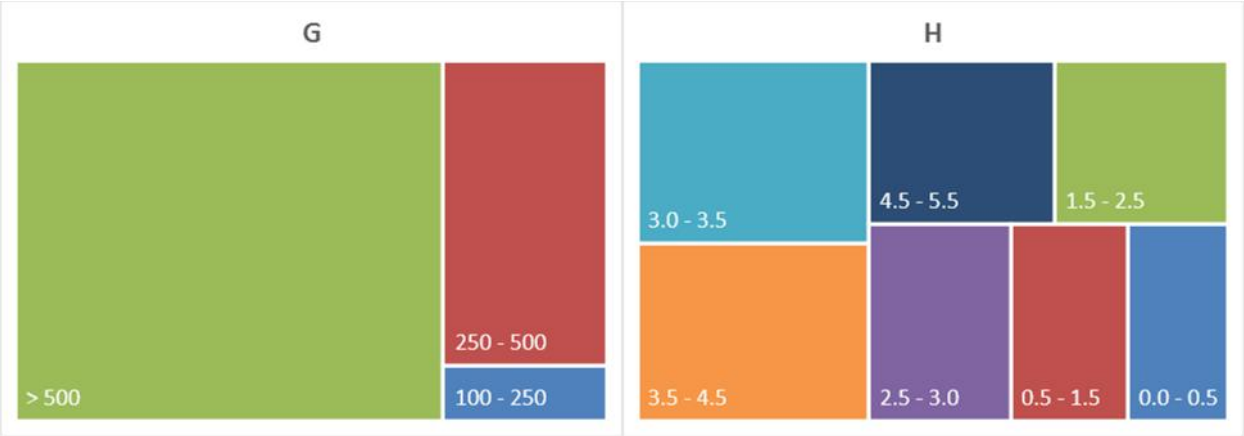

Figura 78. Análisis bivariado del comportamiento de las probabilidades obtenidas mediante el Índice de Frecuencia. G, deslizamientos versus energía del relieve. H, deslizamientos versus densidad de morfoalineamientos.

Los mayores valores de energía del relieve (> 500 m) se asocian a la más alta probabilidad de eventos, mientras que la probabilidad dominante de morfoalineamientos en el territorio es de 3.0 a 3.-5 km/km^2.

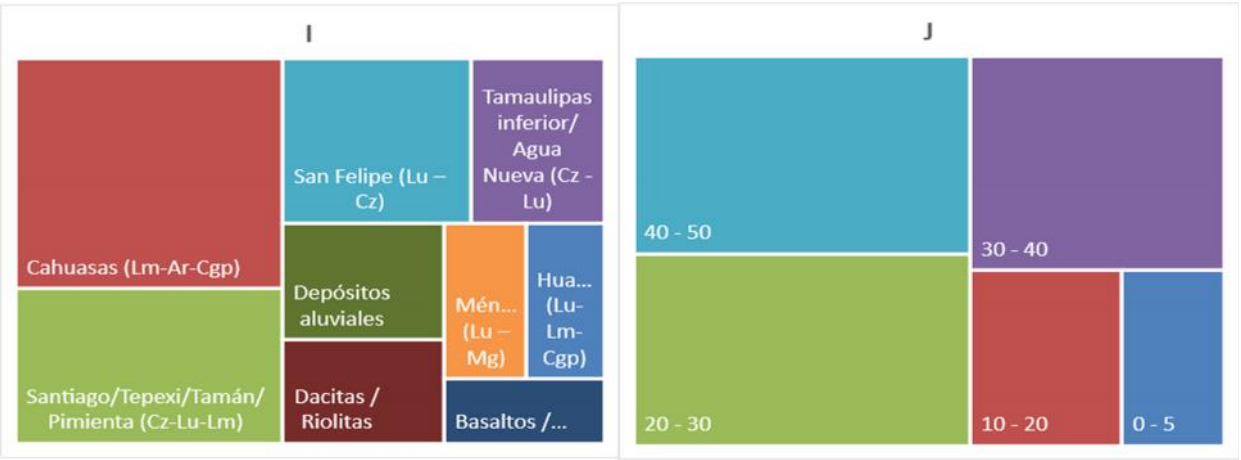

Figura 79. Análisis bivariado del comportamiento de las probabilidades obtenidas mediante el Índice de Frecuencia. I, deslizamientos versus litología de superficie. J, deslizamientos versus índice de resistencia geológica.

El mayor valor aparece en rocas terrígenas como limonitas, areniscas y conglomerados de la formación Cahuasas, dominando rocas con muy mala condición de discontinuidades, fracturadas y muy fuertemente fracturadas, de acuerdo al GSI.

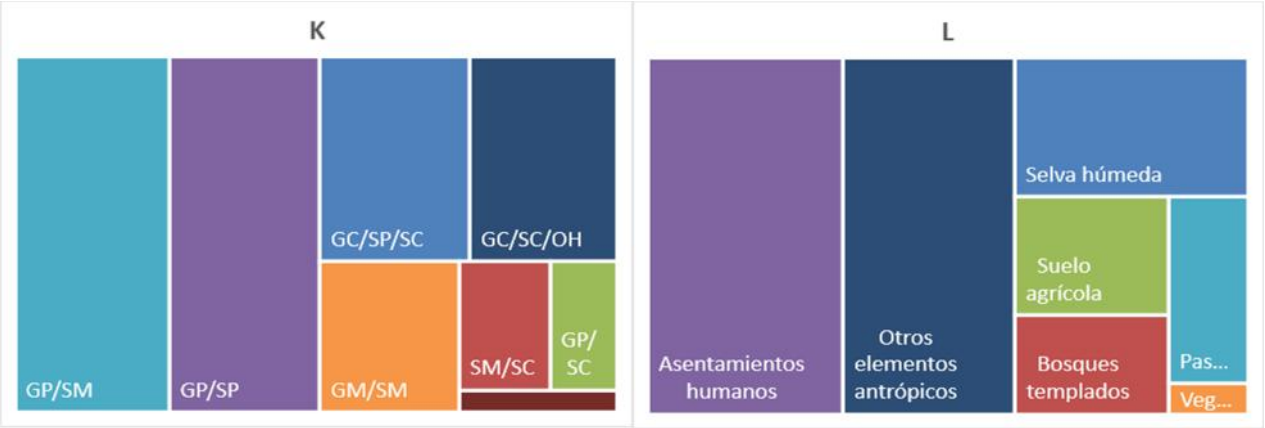

Figura 80. Análisis bivariado del comportamiento de las probabilidades obtenidas mediante el Índice de Frecuencia. K, deslizamientos versus Sistema de Clasificación Unificado de Suelos. H, deslizamientos versus cobertura del suelo.

Las probabilidades más altas corresponden a las gravas mal graduadas; mezclas grava-arena, con pocos finos o sin finos mezclados con arenas mal graduadas; arenas con grava, pocos finos o sin finos (GP–SP) y arenas limosas, mezclas de arena y limo (GP–SM). En las coberturas del suelo, las probabilidades elevadas están asociadas con la intervención antrópica (asentamientos humanos y carreteras, obras industriales, canteras, etc.).

El segundo modelo analizado fue el Índice de Entropía. El comportamiento de la función de densidad de probabilidades en el análisis bivariado de los eventos de deslizamientos y los factores condicionantes, utilizando el índice de entropía, es similar al comportamiento del modelo anterior, tal como se puede constatar en la tabla no. 9 y las figuras 81 al 83.

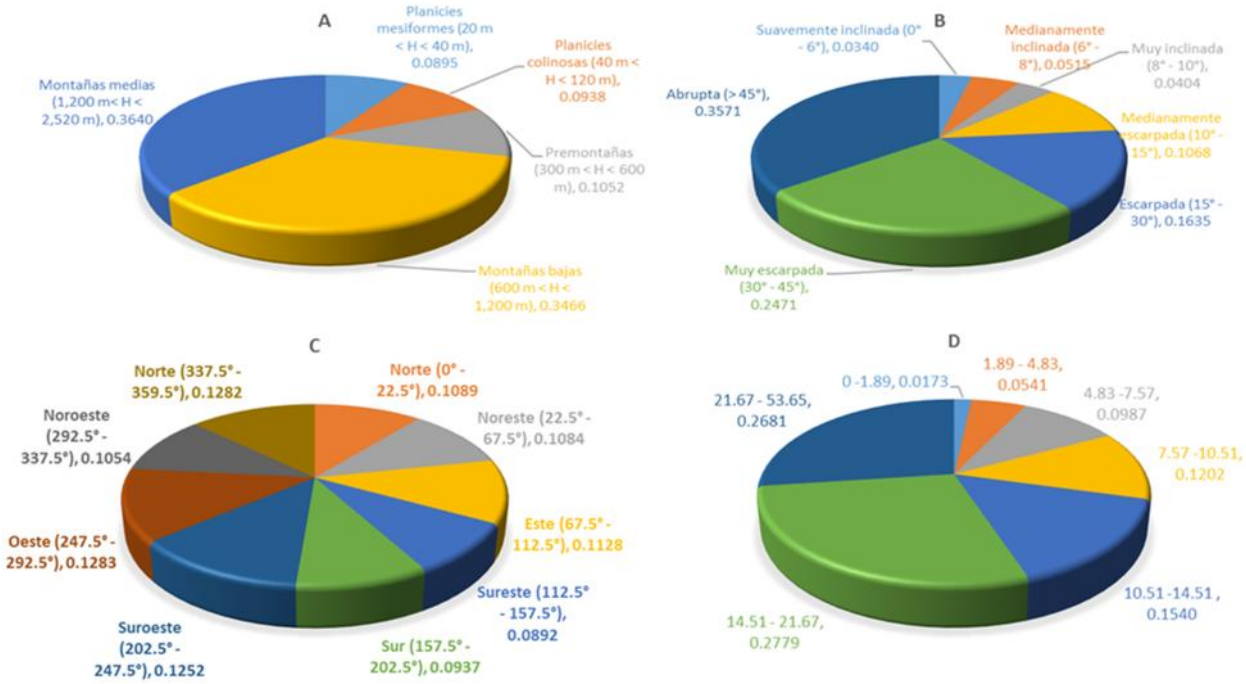

Figura 81. Análisis bivariado del comportamiento de las probabilidades obtenidas mediante el Índice de Entropía. A, deslizamientos versus complejos de categorías del relieve. B, deslizamientos versus complejo de pendientes. C, deslizamientos versus clases de orientación de laderas. D, deslizamientos versus índice de rugosidad.

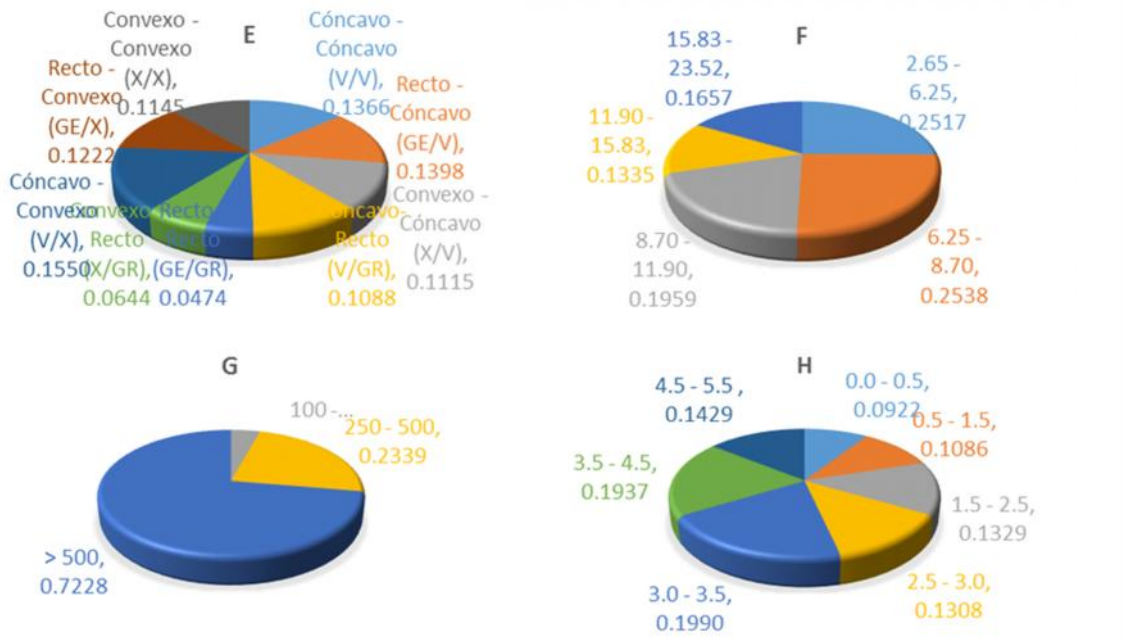

Figura 82. Análisis bivariado del comportamiento de las probabilidades obtenidas mediante el Índice de Entropía. E, deslizamientos versus clases de curvatura de laderas. F, deslizamientos versus índice topográfico de humedad. G, deslizamientos versus energía del relieve. H, deslizamientos versus densidad de morfoalineamientos.

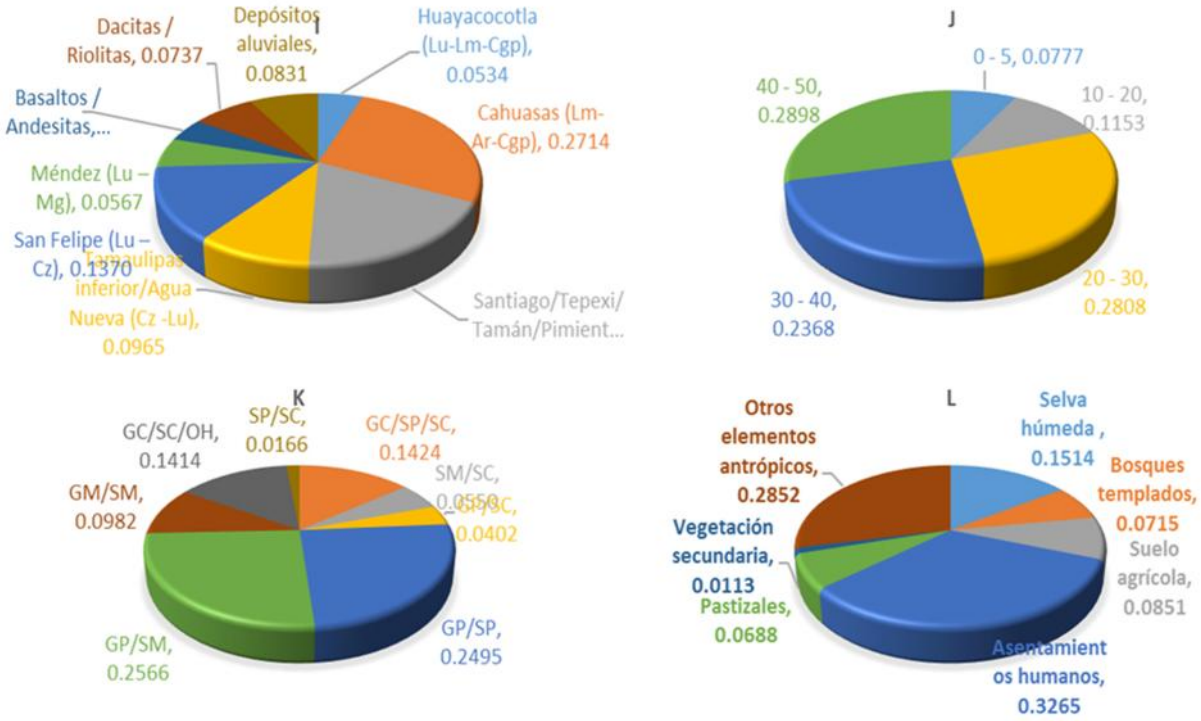

Figura 83. Análisis bivariado del comportamiento de las probabilidades obtenidas mediante el Índice de Entropía. I, deslizamientos versus litología de superficie. J, deslizamientos versus índice de resistencia geológica. K, deslizamientos versus Sistema de Clasificación Unificado de Suelos. H, deslizamientos versus cobertura del suelo.

Las áreas bajo la curva característica del receptor (AUC) se calcularon con Microsoft Excel, con una sensibilidad de 0.72841 para el primer modelo (Índice de Frecuencia), y un valor ligeramente superior 0.80607 para el modelo del Índice de Entropía. (figura 84).

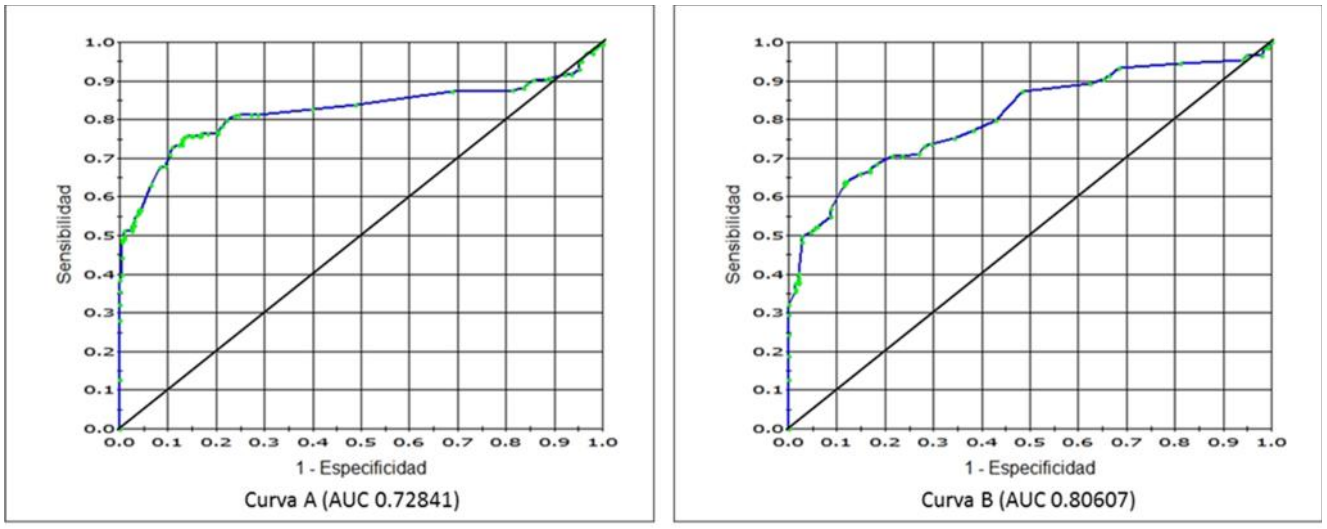

Figura 84. Curvas ROC, A Índice de Frecuencia, modelo 1, y B, Índice de Entropía, modelo 2.

El otro modelo calculado fue un árbol de decisión CART completo, creado a partir del índice de Gini, donde se canceló la fase de prueba y validación de datos con fines exploratorios. Con 80 nodos (figura 85), el color rojo de los nodos terminales representa aquellos con mayor pureza o con el mayor número de casos que pertenecen a la clase "deslizamientos o flujos". Los de color rosa son nodos con una pobre concentración de casos de la clase, y los de color azul casi no pertenecen a la clase en cuestión. Los parámetros considerados para el modelo CART fueron la medida de la heterogeneidad, el nodo raíz, el número de observaciones por nodo y la profundidad de los árboles, entre otros.

Este modelo se utilizó básicamente para explorar y calibrar los resultados que se pretendían alcanzar. Por ser un modelo "sin restricciones", la sensibilidad obtenida para el área bajo la curva operativa es muy alta: 0.96701, tal como se observa en la figura 86.

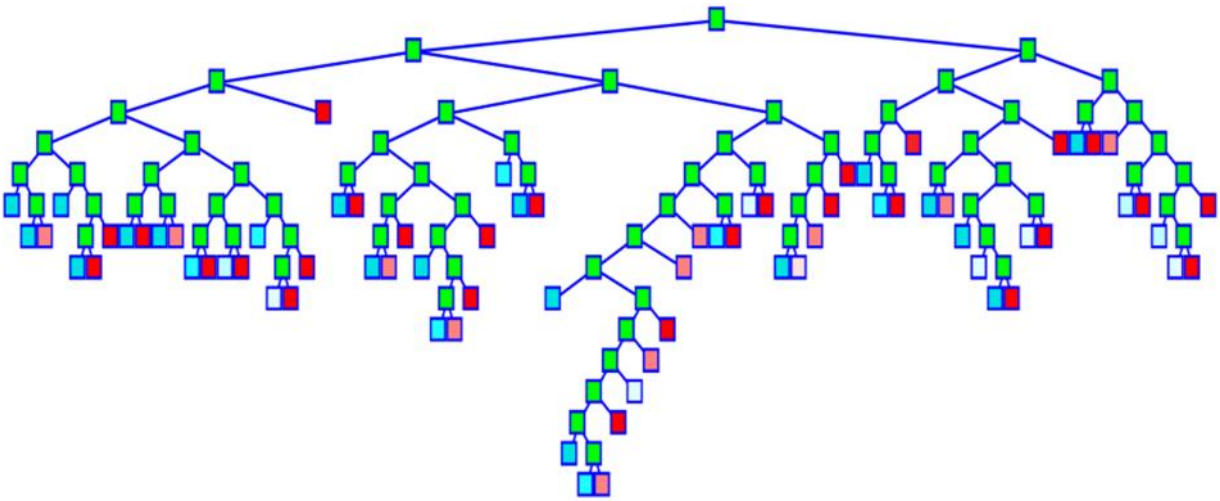

Figura 85. Resumen del árbol completo para el modelo exploratorio.

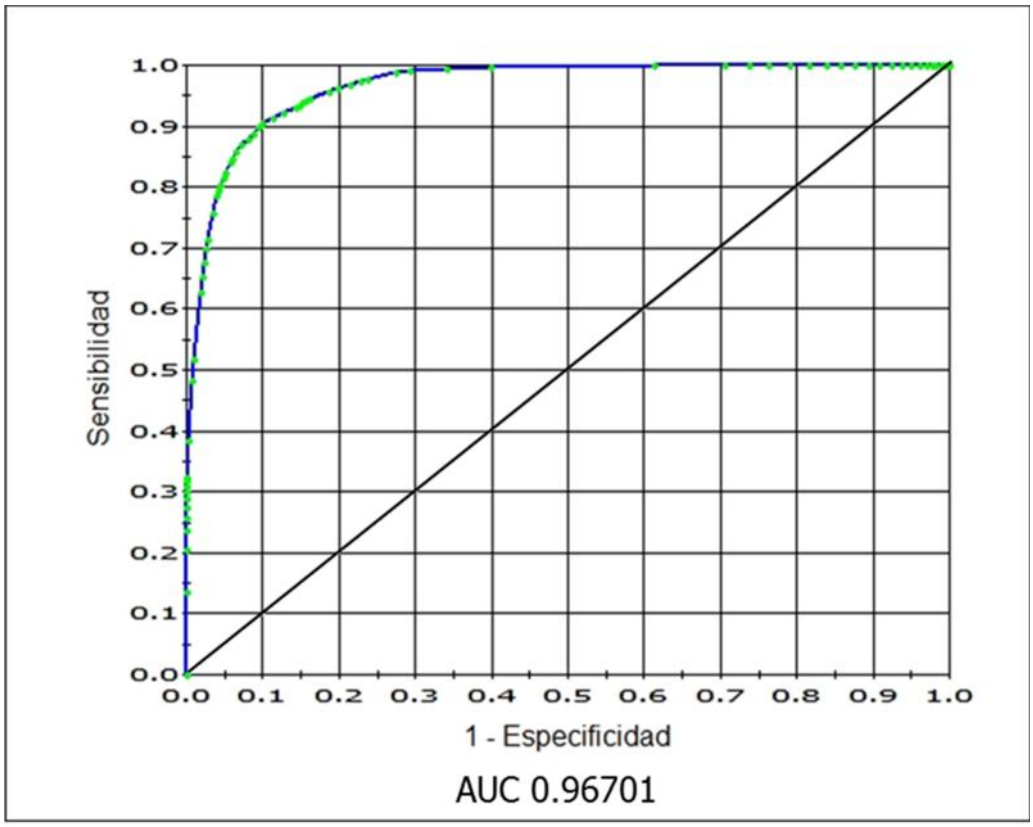

Figura 86. Área bajo la curva del modelo exploratorio. AUC 0.96701

El nodo raíz está definido por un tipo geomorfológico formado por las unidades 1, 7, 8, 10, 11, 12, 13 y sus características se observan en la tabla 11.

Competidor	División de clases	Valor de mejoras	Nodos izquierda	Nodos derecha
Tipos Geomorfológicos	1,7,8,10,11,12,13	0.0917648	454	270
Litología	2,4,7,8	0.0620956	426	298
SUCS	3,4,6,10	0.0335663	527	197
GSI	1,3,4	0.0326000	482	242
Rugosidad	1,2	0.0234284	239	485
Relieve	1,3,4	0.0194791	464	260
Orientación	4,5,6,7	0.0146103	363	361
Pendiente	1,2,3,4	0.0136752	154	570
Curvatura	3,4,5,6,8,9	0.0099223	482	242
Cobertura	2,6,7	0.0074638	331	393
DV	3,4	0.0063359	373	351
ITH	4,5	0.0019698	48	676
Densidad	1,7	0.0011908	101	623

Tabla 11. Características del nodo raíz, modelo exploratorio.

La importancia de las variables de acuerdo al árbol de decisiones son las siguientes (tabla 12):

Variables	Porcentaje de importancia
Tipos geomorfológicos	100.00
Litología	74.79
SUCS	64.17
Orientación	50.03
GSI	40.79
Rugosidad	36.78
Curvatura	32.72
Pendiente	31.59
Densidad	31.56
Relieve	29.56
Cobertura	17.93
DV	15.45
ITH	10.57

Tabla 12. Importancia de las variables, modelo exploratorio.

El modelo 3 (CART) se construyó a partir del índice de Gini como medida de heterogeneidad, con ocho variables como mínimo por nodo y como método de prueba a la validación cruzada. El nodo raíz sigue formado por la categoría "Tipo geomorfológico", y las clases 1, 7, 8, 10, 11, 12, 13, con las siguientes características (tabla 13).

Competidor	División de clases	Valor de mejoras	Nodos izquierda	Nodos derecha
Tipos Geomorfológicos	1,7,8,10,11,12,13	0.0917648	454	270
Litología	2,4,7,8	0.0620956	426	298
SUCS	3,4,6,10	0.0335663	527	197
Rugosidad	1,2	0.0234284	239	485
Orientación	4,5,6,7	0.0146103	363	361
Pendiente	1,2,3,4	0.0136752	154	570
Curvatura	3,4,5,6,8,9	0.0099223	482	242
Densidad	1,7	0.0011908	101	623

Tabla 13. Importancia de las variables, modelo 3.

Las variables más importantes fueron las siguientes:

Variables	Porcentaje de importancia
Tipos geomorfológicos	100.00
Orientación	66.10
Curvatura	53.70
Litología	52.82
Rugosidad	50.38
SUCS	39.42
Densidad	36.75
Pendiente	36.68

Tabla 14. Importancia de las variables, modelo 3.

Tal como se muestra en la tabla anterior, algunas variables pueden usarse varias veces, mientras que otras (categorías del relieve, cobertura, dv, ith) no se vuelven a utilizar. La regla generada en cada paso maximiza la pureza de la clase dentro de cada uno de los dos subconjuntos resultantes (deslizamientos y flujos). Cada subconjunto se divide aún más sobre la base de relaciones totalmente diferentes. CART construye un árbol basado en el criterio de pureza del nodo que luego se elimina mediante la validación cruzada para evitar la sobreexposición. En este modelo, al utilizar un procedimiento más riguroso de poda de árboles, se incrementa el valor de la importancia de las variables para dividir los nodos y las ramas.

Para la clase "deslizamientos", el árbol construido adoptó la siguiente estructura (figura 87): tres nodos (1, 2, 5) con la mayor pureza o el mayor número de casos

que pertenecen a la clase "deslizamientos"; y cuatro nodos, con una pobre concentración de casos de la clase citada.

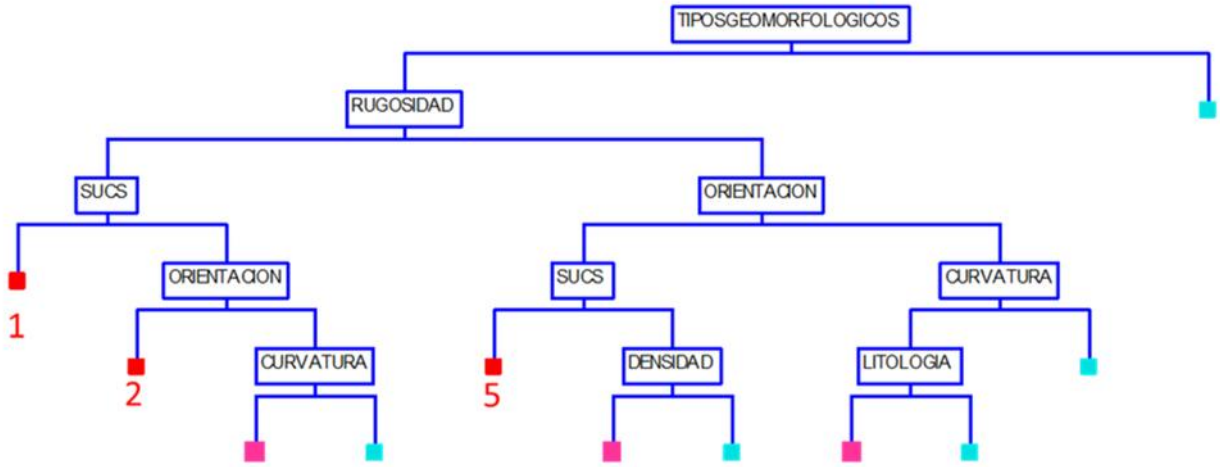

Figura 87. Árbol perteneciente a la clase "deslizamientos", con sus nodos terminales de mayor pureza, modelo 3.

Las reglas de probabilidades de pertenencia de estos nodos se detallan a continuación.

```
/*Reglas para el nodo terminal 1*/
if
(
  (
       SUCS == 3 ||
       SUCS == 4 ||
       SUCS == 9
  ) &&
  (
       RUGOSIDAD == 1 ||
       RUGOSIDAD == 2 ||
       RUGOSIDAD == 5 ||
       RUGOSIDAD == 7
  ) &&
  (
       TIPOSGEOMORFOLOGICOS == 1 ||
       TIPOSGEOMORFOLOGICOS == 7 ||
       TIPOSGEOMORFOLOGICOS == 8 ||
       TIPOSGEOMORFOLOGICOS == 10 ||
       TIPOSGEOMORFOLOGICOS == 11 ||
       TIPOSGEOMORFOLOGICOS == 12 ||
       TIPOSGEOMORFOLOGICOS == 13
  )
)
```

```
{
    terminalNode = 1;
    class = Deslizamientos;
    probClass1 = 0.866071;
    probClass2 = 0.133929;
}



/* Reglas para el nodo terminal 2*/
if
(
  (
       ORIENTACION == 4 ||
       ORIENTACION == 5 ||
       ORIENTACION == 9
  ) &&
  (
       SUCS == 2 ||
       SUCS == 5 ||
       SUCS == 6 ||
       SUCS == 10
  ) &&
  (
       RUGOSIDAD == 1 ||
       RUGOSIDAD == 2 ||
       RUGOSIDAD == 5 ||
       RUGOSIDAD == 7
  ) &&
  (
       TIPOSGEOMORFOLOGICOS == 1 ||
       TIPOSGEOMORFOLOGICOS == 7 ||
       TIPOSGEOMORFOLOGICOS == 8 ||
       TIPOSGEOMORFOLOGICOS == 10 ||
       TIPOSGEOMORFOLOGICOS == 11 ||
       TIPOSGEOMORFOLOGICOS == 12 ||
       TIPOSGEOMORFOLOGICOS == 13
  )
)

{
    terminalNode = 2;
    class = Deslizamientos;
    probClass1 = 0.911765;
    probClass2 = 0.0882353;
}


/* Reglas para el nodo terminal 5*/
if
(
  (
       SUCS == 2 ||
       SUCS == 4 ||
       SUCS == 10
  ) &&
  (
```

```
        ORIENTACION == 4 ||
        ORIENTACION == 5 ||
        ORIENTACION == 6 ||
        ORIENTACION == 7
   ) &&
   (
        RUGOSIDAD == 3 ||
        RUGOSIDAD == 4 ||
        RUGOSIDAD == 6
   ) &&
   (
        TIPOSGEOMORFOLOGICOS == 1 ||
        TIPOSGEOMORFOLOGICOS == 7 ||
        TIPOSGEOMORFOLOGICOS == 8 ||
        TIPOSGEOMORFOLOGICOS == 10 ||
        TIPOSGEOMORFOLOGICOS == 11 ||
        TIPOSGEOMORFOLOGICOS == 12 ||
        TIPOSGEOMORFOLOGICOS == 13
   )
)

{
    terminalNode = 5;
    class = Deslizamientos;
    probClass1 = 0.78125;
    probClass2 = 0.21875;
}
```

Para la clase "flujos", el árbol construido adoptó la siguiente estructura (figura 88): cuatro nodos (4, 7, 10,11) con la mayor pureza o el mayor número de casos que pertenecen a la clase "flujos", y un nodo con una pobre concentración de casos de la clase citada.

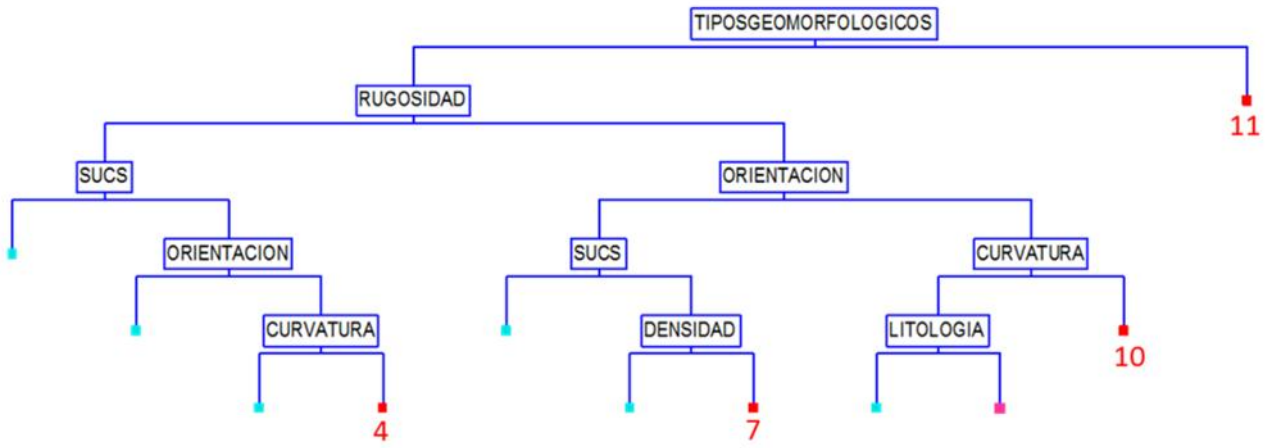

Figura 88. Árbol perteneciente a la clase "flujos" con sus nodos terminales de mayor pureza, modelo 3.

Las reglas de probabilidades de pertenencia de estos nodos a la clase "flujos" se detallan a continuación.

```
/* Reglas para el nodo terminal 4*/

if
(
  (
       CURVATURA == 1 ||
       CURVATURA == 2 ||
       CURVATURA == 6
  ) &&
  (
       ORIENTACION == 2 ||
       ORIENTACION == 3 ||
       ORIENTACION == 6 ||
       ORIENTACION == 7 ||
       ORIENTACION == 8 ||
       ORIENTACION == 10
  ) &&
  (
       SUCS == 2 ||
       SUCS == 5 ||
       SUCS == 6 ||
       SUCS == 10
  ) &&
  (
       RUGOSIDAD == 1 ||
       RUGOSIDAD == 2 ||
       RUGOSIDAD == 5 ||
       RUGOSIDAD == 7
  ) &&
  (
       TIPOSGEOMORFOLOGICOS == 1 ||
       TIPOSGEOMORFOLOGICOS == 7 ||
       TIPOSGEOMORFOLOGICOS == 8 ||
       TIPOSGEOMORFOLOGICOS == 10 ||
       TIPOSGEOMORFOLOGICOS == 11 ||
       TIPOSGEOMORFOLOGICOS == 12 ||
       TIPOSGEOMORFOLOGICOS == 13
  )
)

{
    terminalNode = 4;
    class = Flujos;
    probClass1 = 0.0666667;
    probClass2 = 0.933333;
}

/* Reglas para el nodo terminal 7*/

if
(
```

```
  (
       DENSIDAD == 3 ||
       DENSIDAD == 4
  ) &&
  (
       SUCS == 3 ||
       SUCS == 5 ||
       SUCS == 6 ||
       SUCS == 9
  ) &&
  (
       ORIENTACION == 4 ||
       ORIENTACION == 5 ||
       ORIENTACION == 6 ||
       ORIENTACION == 7
  ) &&
  (
       RUGOSIDAD == 3 ||
       RUGOSIDAD == 4 ||
       RUGOSIDAD == 6
  ) &&
  (
       TIPOSGEOMORFOLOGICOS == 1 ||
       TIPOSGEOMORFOLOGICOS == 7 ||
       TIPOSGEOMORFOLOGICOS == 8 ||
       TIPOSGEOMORFOLOGICOS == 10 ||
       TIPOSGEOMORFOLOGICOS == 11 ||
       TIPOSGEOMORFOLOGICOS == 12 ||
       TIPOSGEOMORFOLOGICOS == 13
  )
)

{
    terminalNode = 7;
    class = Flujos;
    probClass1 = 0.1875;
    probClass2 = 0.8125;
}

/* Reglas para el nodo terminal 10*/

if
(
  (
       CURVATURA == 2 ||
       CURVATURA == 5 ||
       CURVATURA == 9
  ) &&
  (
       ORIENTACION == 2 ||
       ORIENTACION == 3 ||
       ORIENTACION == 8 ||
       ORIENTACION == 9 ||
       ORIENTACION == 10
  ) &&
  (
       RUGOSIDAD == 3 ||
```

```
       RUGOSIDAD == 4 ||
       RUGOSIDAD == 6
  ) &&
  (
       TIPOSGEOMORFOLOGICOS == 1 ||
       TIPOSGEOMORFOLOGICOS == 7 ||
       TIPOSGEOMORFOLOGICOS == 8 ||
       TIPOSGEOMORFOLOGICOS == 10 ||
       TIPOSGEOMORFOLOGICOS == 11 ||
       TIPOSGEOMORFOLOGICOS == 12 ||
       TIPOSGEOMORFOLOGICOS == 13
  )
)

{
    terminalNode = 10;
    class = Flujos;
    probClass1 = 0.222222;
    probClass2 = 0.777778;
}

/* Reglas para el nodo terminal 11*/

if
(
  (
       SUCS == 2 ||
       SUCS == 5 ||
       SUCS == 9
  ) &&
  (
       LITOLOGIA == 2 ||
       LITOLOGIA == 3 ||
       LITOLOGIA == 4
  ) &&
  (
       DV == 3 ||
       DV == 4
  ) &&
 (
       RUGOSIDAD == 2 ||
       RUGOSIDAD == 4 ||
       RUGOSIDAD == 6
  ) &&
  (
       CURVATURA == 2 ||
       CURVATURA == 4 ||
       CURVATURA == 6 ||
       CURVATURA == 9
  )
 (
       TIPOSGEOMORFOLOGICOS == 2 ||
       TIPOSGEOMORFOLOGICOS == 3 ||
       TIPOSGEOMORFOLOGICOS == 4 ||
       TIPOSGEOMORFOLOGICOS == 5 ||
       TIPOSGEOMORFOLOGICOS == 6 ||
       TIPOSGEOMORFOLOGICOS == 9 ||
```

```
        TIPOSGEOMORFOLOGICOS == 14 ||
        TIPOSGEOMORFOLOGICOS == 15
   )
)

{
    terminalNode = 11;
    class = Flujos;
    probClass1 = 0.174074;
    probClass2 = 0.825926;
}
```

Para la validación de resultados se empleó el método de validación cruzada, en el cual el algoritmo divide el conjunto de datos de manera aleatoria en dos grupos: el de aprendizaje, con la finalidad de obtener un patrón de comportamiento y aplicarlo en datos futuros; y el grupo de validación, que evalúa el patrón obtenido y el comportamiento del modelo.

La siguiente tabla es la matriz de confusión obtenida a partir del método de validación cruzada. Aunque ambos grupos poseen una buena representatividad en términos clasificatorios, la muestra de aprendizaje resultó más predictiva que la muestra de validación (tal como debe comportarse), y al interior de los inventarios de eventos, los flujos pudieron predecirse mejor que los deslizamientos complejos.

Clases Eventos	Subgrupo	Total casos por grupos	% Casos clasificados correctos	% Casos clasificados incorrectos	Predicción de casos (%)		Costo
					Desliz n 331	Flujos n 393	
Deslizamientos	Aprendizaje	322	80.12	19.88	258 (77.95)	64 (16.29)	0.19876
Flujos	Aprendizaje	402	**81.84**	18.16	73 (22.05)	**329 (83.71)**	**0.18159**
Promedio	Aprendizaje		72.66				
Porcentaje en general			73.20				
Especificidad			81.84				
Sensibilidad			80.12				
Precisión			77.95				
Exactitud			79.02				
Área bajo la curva			0.85489				
Varianza del área bajo la curva			0.01200				
					Desliz n 308	Flujos n 416	
Deslizamientos	Validación	322	67.70	32.30	218 (70.77)	104 (25.00)	0.32298
Flujos	Validación	402	**77.60**	22.40	90 (29.23)	**312 (75.00)**	**0.22388**
Promedio	Validación		72.66				
Porcentaje en general			73.20				
Especificidad			77.61				
Sensibilidad			67.70				
Precisión			70.78				
Exactitud			69.21				

Área bajo la curva			0.75717				
Varianza del área bajo la curva			0.00036				

Tabla 14. Matriz de confusión en porcentaje de casos, modelo 3.

Ésta, se transformó en una matriz de confusión de predicción de probabilidades, dando como resultado que el pronóstico de flujos bien clasificados fuera superior a las probabilidades de predicción de deslizamientos bien clasificados. De otra manera, en la muestra de aprendizaje, la probabilidad de clasificar con errores los deslizamientos es de 0.3961, y de clasificar equivocadamente los flujos, de 0.3285; mientras que, en la muestra de validación, las probabilidades de clasificación con errores de los deslizamientos es 0.3634, y las de clasificar equivocadamente los flujos es de 0.2065.

Clases Eventos	Subgrupo	Total casos por grupos	Casos clasificados correctos	Casos clasificados incorrectos	Predicción de casos		Costo
					Desliz	Flujos	
Deslizamientos	Aprendizaje	322	0.60385	**0.15910**	194.44	127.56	0.19876
Flujos	Aprendizaje	402	**0.67153**	0.11628	132.05	269.95	0.18159
Predicción total	Aprendizaje	724	0.64143		326.49	397.51	
Especificidad			0.67153				
Sensibilidad			0.60385				
Referencias falsas			0.39615				
Respuestas falsas			0.32847				
Área bajo la curva			0.88579				
Varianza del área bajo la curva			0.00015				
					Desliz	Flujos	
Deslizamientos	Validación	322	0.63665	0.19189	205.00	117.00	0.32298
Flujos	Validación	402	**0.79353**	0.23828	83.00	319.00	0.22388
Predicción total	Validación		0.72376		288.00	436.00	
Especificidad			0.79353				
Sensibilidad			0.63665				
Precisión			0.36335				
Exactitud			0.20647				
Área bajo la curva			0.80200				
Varianza del área bajo la curva			0.00029				

Tabla 15. Matriz de confusión en probabilidades pronosticadas, modelo 3.

La figura 89 muestra las dos curvas ROC: el caso **a**, es la curva del grupo de aprendizaje, y la curva **b** es del grupo de validación.

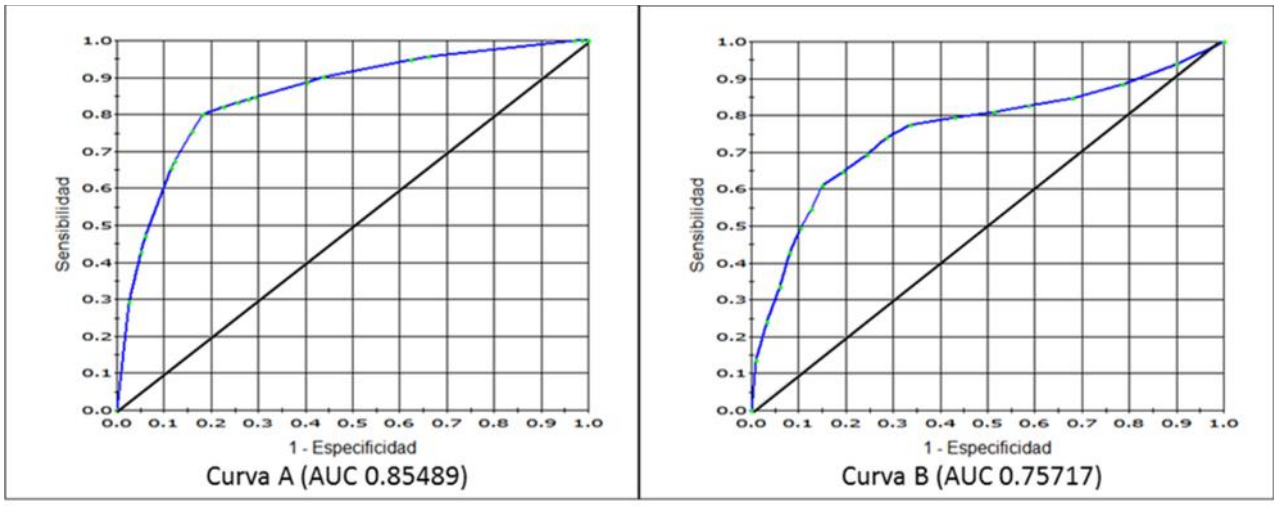

Figura 89. Curvas ROC, **a** grupo de aprendizaje y **b**, grupo de validación del modelo 3, CART. El promedio para los dos grupos es de AUC 0.843895.

Las reglas de pertenencia de los nodos terminales permitieron construir el mapa de susceptibilidad a partir de la transformación de la regla en expresiones lógicas, mediante álgebra de mapas en ArcGIS 10.3, de la siguiente manera:

```
if ((TIPOSGEOMORFOLOGICOS == 1 OR TIPOSGEOMORFOLOGICOS == 12 OR
TIPOSGEOMORFOLOGICOS == 13) AND (LITOLOGIA == 2 OR LITOLOGIA == 3 OR
LITOLOGIA == 4 OR LITOLOGIA == 7 OR LITOLOGIA == 8) AND (RUGOSIDAD
== 1 OR RUGOSIDAD == 2 OR RUGOSIDAD == 5 OR RUGOSIDAD == 7)) then
P(ij) = 0.903846
endif;
```

El cuarto modelo se obtuvo mediante el algoritmo MARS (*Multivariate adaptive regression splines*) que, como se explicó anteriormente, combina la regresión lineal clásica, la construcción matemática de splines y la partición recursiva binaria para encontrar relaciones lineales y no lineales entre los predictores. Para cumplir con esto, el algoritmo aproxima la función mediante un conjunto de regresiones lineales llamadas "funciones de base". El valor Y es un puntaje, no una probabilidad, y la distribución de los valores de puntuación no está restringida al rango 0-1.

Las seis funciones de base obtenidas fueron:

```
BF1 = (TIPOSGEOMORFOLOGICOS in (9, 4, 5, 2, 14, 3, 6, 15));
```

```
BF3 = (TIPOSGEOMORFOLOGICOS in (1, 11, 13, 9, 4, 2, 14, 12, 3, 6,
15));
BF5 = (ORIENTACION in (4, 6, 7, 5));
BF7 = (RUGOSIDAD in (2, 1));
BF9 = (CURVATURA in (1, 2));
BF11 = (LITOLOGIA in (10, 1));
```

donde:

Y = 0.433904 - 0.52172 * BF1 + 0.18827 * BF3 + 0.168645 * BF5 + 0.15403 * BF7 - 0.128281 * BF9 - 0.296561 * BF11; ecuación 18

Los puntos donde cambia la pendiente de estas funciones básicas se denominan nudos (por ejemplo, -0.52172). Así, las líneas de regresiones se bifurcan en los nudos que señalan el final de una región de datos y el inicio de la otra, con diferentes comportamientos de la función. Dado que se emplearon variables categóricas, las funciones de base aparecen con los operadores booleanos; por ejemplo:

BF11 = (Litología == 10 OR Litología == 1)

El algoritmo funciona de la siguiente manera: primero se produce un modelo de árbol sobredimensionado; después, los nudos que menos contribuyen a la eficiencia del modelo se omiten en la poda hacia atrás, sobreviviendo sólo seis funciones básicas. De este modo se obtiene el mejor modelo: mediante validación cruzada, que aplica una penalización a cada nudo añadido para buscar valores de baja complejidad.

La matriz de confusión obtenida (tabla 16) muestra el comportamiento del grupo de aprendizaje, con valores altos del área bajo la curva (0.81489),–señalando la efectividad del modelo propuesto.

Clases Eventos	Subgrupo	Total casos por grupos	% Casos clasificados correctos	% Casos clasificados incorrectos	Predicción de casos (%)	
					Desliz n 324	Flujos n 400 La
Deslizamientos	Aprendizaje	322	71.74	28.26	**231**	91
Flujos	Aprendizaje	402	**76.87**	23.13	93	**309**
Promedio	Aprendizaje		74.30			
Porcentaje en general			74.59			
Especificidad			76.87			
Sensibilidad			71.74			
Precisión			71.30			
Exactitud			71.52			
Área bajo la curva			**0.81489**			
Varianza del área bajo la curva			1.85507			
					Desliz n 348	Flujos n 316
Deslizamientos	Validación	322	73.29	26.71	**236**	86
Flujos	Validación	402	**72.14**	27.86	112	**290**
Promedio	Validación		72.72			
Porcentaje en general			72.65			
Especificidad			72.14			
Sensibilidad			73.29			
Precisión			67.82			
Exactitud			70.45			
Área bajo la curva			**0.78905**			
Varianza del área bajo la curva			0.00029			

Tabla 16. Matriz de confusión en porcentaje de casos, modelo 4.

La figura 90 muestra las dos curvas ROC, el caso **A**, es la curva del grupo de aprendizaje, y la curva **B** es del grupo de validación.

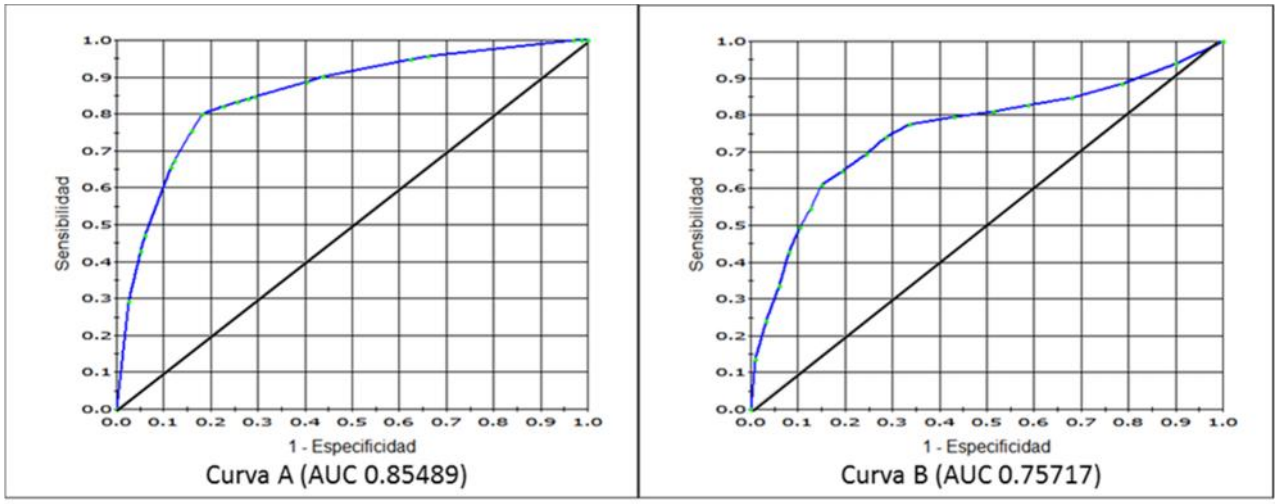

Figura 90. Curvas ROC, A grupo de aprendizaje y B, grupo de validación del modelo 4, MARS. El promedio de AUC es 0.80197

Se diseñaron dos grupos de mapas. El primero, denominado "mapas de maniobras", contiene 420 instrumentos que reflejan directamente los valores probabilísticos obtenidos de los cuatro modelos: Índice de Frecuencia; Índice de Entropía; CART y MARS.

El segundo conjunto contiene los correspondientes mapas binarios (adecuados /no adecuados) después de una reclasificación de los valores *Y* de los modelos óptimos para cada método estadístico. El umbral óptimo se calculó a partir de la sensibilidad máxima de entrenamiento, más los valores de especificidad, minimizando tanto los errores positivos falsos como negativos falsos. Finalmente, los mapas binarios se combinaron para detectar acuerdos y desacuerdos repetidos.

El resultado final parcial son cuatro mapas de síntesis, uno para cada método, calculado a partir de la bondad de ajuste por método y combinándolo en una sola suma. El mapa de susceptibilidad para el modelo 1 (Índice de Frecuencia) se elaboró con variables continuas entre 0.144365 a 1.2887, subdivididas en cinco clases, de muy baja a muy alta (figura 91).

El mapa de susceptibilidad para el modelo 2 (Índice de Entropía) se construyó con variables continuas entre 0.00117759 a 0.0474786, subdivididas en cinco clases (figura 92).

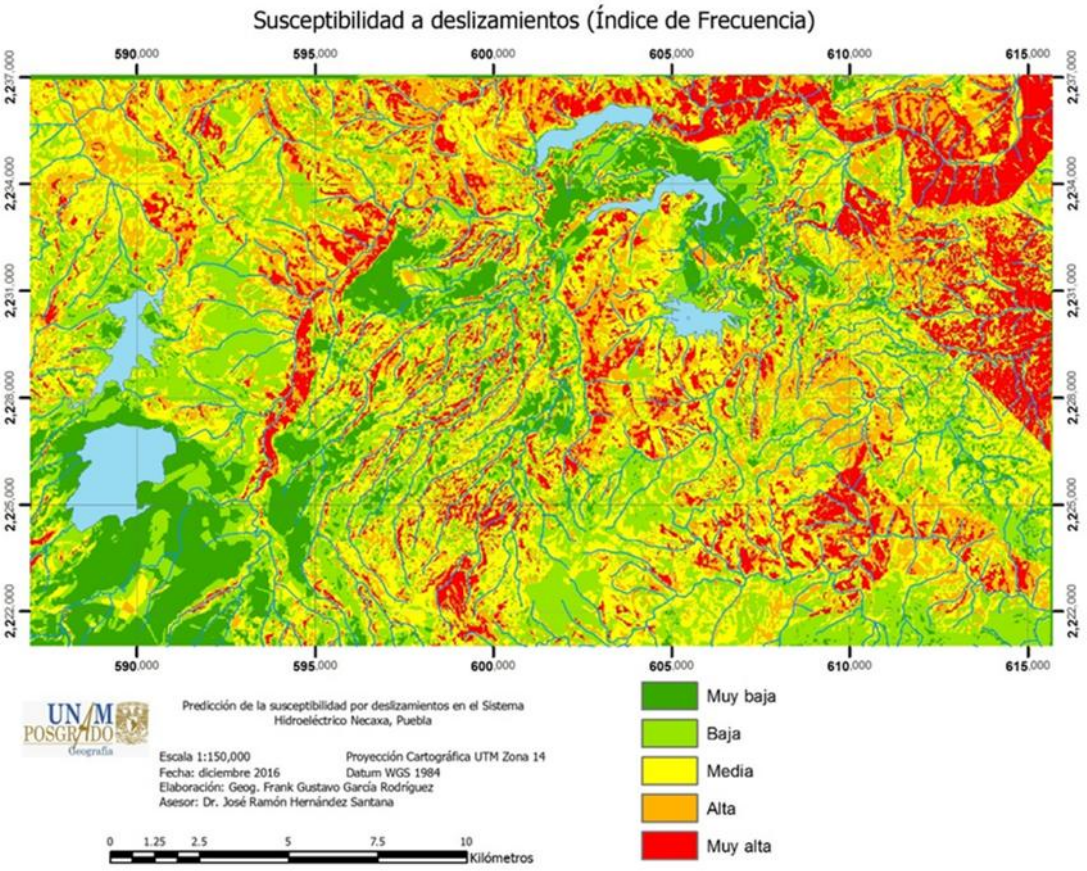

Figura 91. Mapa de susceptibilidad obtenido por el modelo 1, Índice de Frecuencia.

El mapa de susceptibilidad para el modelo 3 (árbol de decisión CART), figura 93, posee un continuo de variables entre 1.65185 y 7.3333, mismas que se subdividieron en cinco clases de susceptibilidad.

El cuarto mapa de susceptibilidad para el modelo cuatro (MARS) posee un continuo de variables entre 0.0256562 y 1.06499, subdivididas en cinco clases (figura 94).

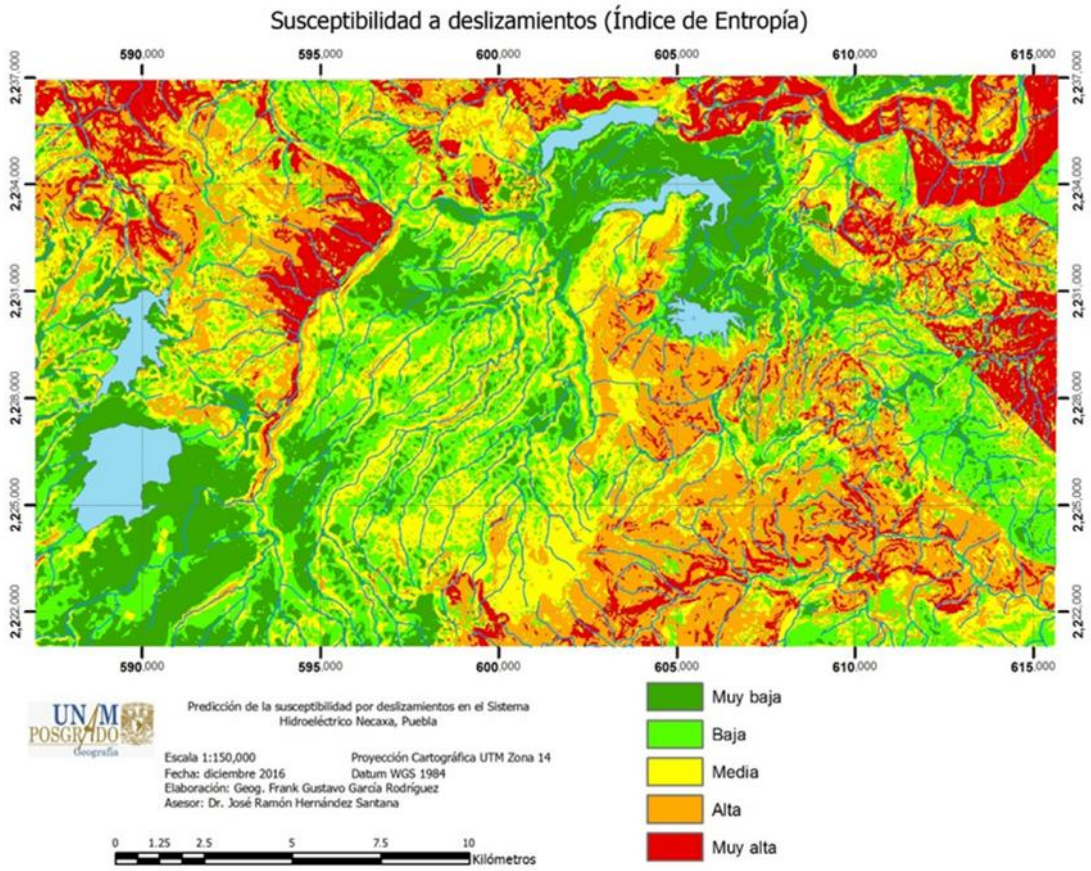

Figura 92. Mapa de susceptibilidad obtenido por el modelo 2, Índice de Entropía.

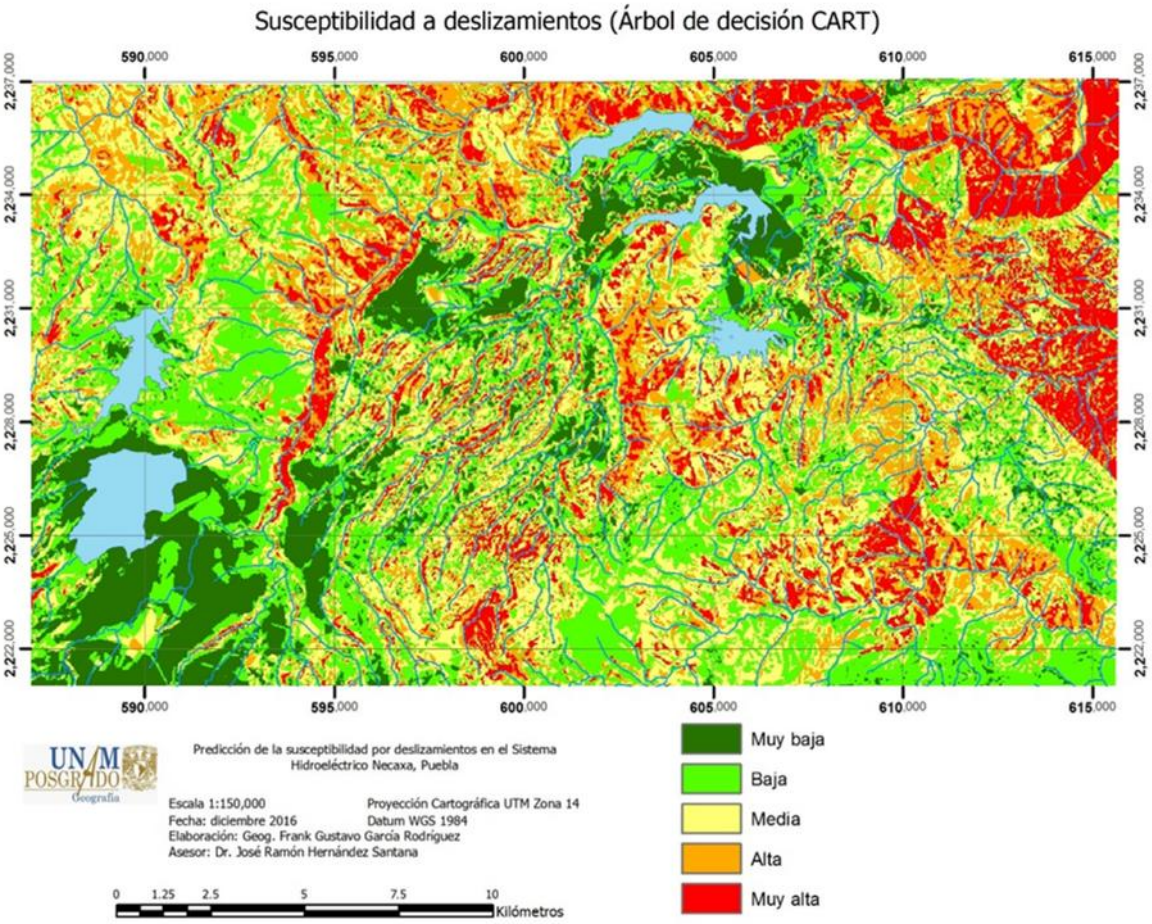

Figura 93. Mapa de susceptibilidad obtenido por el modelo 3, Árbol de decisión CART.

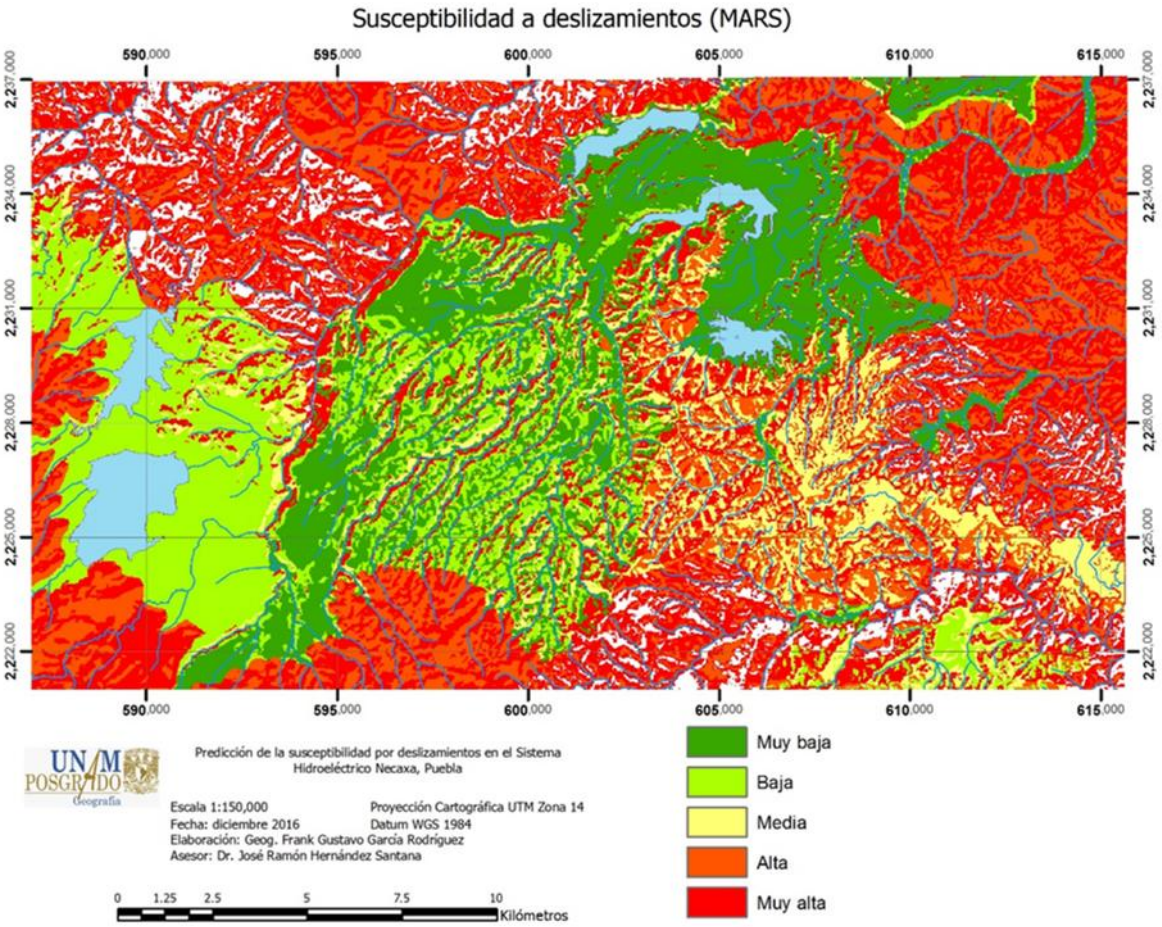

Figura 94. Mapa de susceptibilidad obtenido por el modelo 43, MARS.

El comportamiento de las probabilidades por cada clase de susceptibilidad en los cuatro mapas de susceptibilidad es el siguiente:

Clases	Índice Frecuencia (AUC 0.728410)	Índice Entropía (AUC 0.80607)	CART (AUC 0.843895)	MARS (AUC 0.80197)
Muy baja	0.125883	0.183629	0.12588263	0.193355
Baja	0.272540	0.227245	0.2725404	0.162544
Media	0.296084	0.232146	0.29608449	0.098623
Alta	0.175911	0.235578	0.17591056	0.209739
Muy alta	0.129582	0.121402	0.12958193	0.335739

Tabla 17. Relación de probabilidades por clase y modelo.

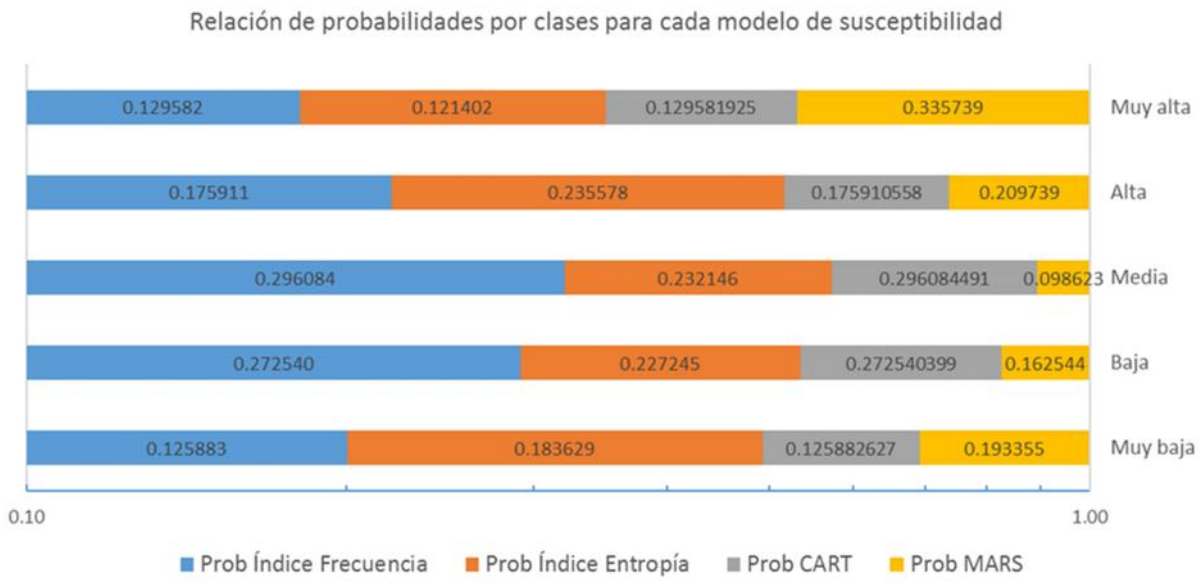

Figura 95. Relación de probabilidades por clase para cada modelo de susceptibilidad.

A pesar de que el área bajo la curva característica del receptor (AUC) en el modelo MARS ocupa el segundo lugar en orden decreciente, el comportamiento probabilístico de las clases adopta una forma de parábola invertida, incrementando sustancialmente la probabilidad de ocurrencia de la clase de susceptibilidad "Muy alta". Los otros tres modelos se comportan de manera similar (distribución normal) en las cinco clases de susceptibilidad.

A continuación, se describen dos patrones de comportamiento: uno para los deslizamientos y otro para los flujos, de acuerdo a la probabilidad de ocurrencia mostrada en los nodos del modelo CART.

Patrón de comportamiento A.

El primer patrón, asociado con los deslizamientos y una probabilidad de 0.911765, corresponde a elevaciones donde dominan procesos estructuro– erosivos (gravitacionales y kársticos), sobre rocas clásticas terrígenas carbonatadas sobre suelos mal graduados, con predominio de gravas y arenas con pocos finos (limos y arcillas), y una alta concentración de cambios bruscos por vectores de las pendientes

(rupturas concentradas en pequeñas unidades de superficie). El dominio de orientación de laderas es sur–sureste.

Patrón de comportamiento B.

El segundo patrón, asociado con los flujos y derrubios, y probabilidades de 0.933333, corresponde a un dominio similar al anterior, pero con la novedad de que intervienen clases de curvaturas cóncavas y cóncavas–rectilíneas.

VI. Conclusiones.

Validar nuevos elementos metodológicos para mejorar el conocimiento sobre los procesos de riesgos geomorfológicos por deslizamientos en el área que ocupa el Sistema Hidroeléctrico Necaxa, como base para la predicción efectiva de deslizamientos a futuro, ha sido el objetivo del desarrollo del presente trabajo. El cumplimiento a cabalidad de los resultados finales de todos y cada uno de los cuatro modelos estadísticos aplicados mediante la obtención y comparación de los mismos, permitieron la constatación y validación afirmativas de la hipótesis principal planteada, de manera concluyente.

De esta manera, puede afirmarse que la validez de los métodos cuantitativos empleados mejora el rendimiento de la cartografía de susceptibilidad de eventos gravitacionales, en términos generales. Respecto al análisis de minería de datos y el reconocimiento de patrones, su uso permite la construcción de modelos de susceptibilidad a partir de variables geomorfológicas simples, conocidas por la comunidad académica como las clases de pendientes, la orientación de las laderas y la cobertura del suelo, entre otras, utilizando formulaciones estadísticas objetivas y replicables.

El área bajo la curva característica del receptor y la validación cruzada permitió la comparación de cuatro métodos estadísticos, brindando capacidad para evaluar la predicción probabilística de los modelos. Sin embargo, como se señala en el capítulo correspondiente al marco teórico, los modelos sólo pueden explicar una parte de la distribución espacial de los eventos, pues no derivan de ellos la explicación de las relaciones causales entre las variables independientes y la ocurrencia de los eventos.

Al ocurrir un evento los componentes intrínsecos del sistema se modifican (la longitud de la ladera, las zonas de deposición de los depósitos coluviales, la estructura interna de los horizontes del suelo, etc.), por lo que se suele recurrir a premisas muy básicas de partida como el "uniformismo". Empero, esto no es óbice para explorar satisfactoriamente -en términos de posibilidades o probabilidades-, la

susceptibilidad por eventos geomorfológicos a nivel regional; pues es precisamente a escala regional donde estos métodos constituyen una alternativa interesante para evaluar y comparar los patrones no causales que intervienen en la predicción de los eventos gravitacionales.

La razón que explica la utilización del área bajo la curva característica del receptor (AUC) para evaluar los rendimientos de los modelos es que no se limita a un único umbral de decisión, -seleccionado arbitrariamente entre las clases adecuadas y no adecuadas-; más bien, es porque que resume todos los umbrales de decisión posibles. El AUC puede administrar valores que van desde 0.5 (el clasificador aleatorio) hasta 1.0 (el clasificador perfecto). Las curvas ROC y las estadísticas del AUC son invariantes bajo las distribuciones cambiantes en las clases binarias; es decir, presencia/ausencia; en realidad, representan el "porcentaje de observaciones de la clase 1" versus el "porcentaje de observaciones de la clase 0", pues funcionan independientemente del equilibrio entre las dos clases.

Felicísimo y sus colaboradores203 afirman que el valor de AUC es el mismo que la probabilidad demostrada cuando una observación de clase 1 obtiene una puntuación más alta que una de clase 0. En su trabajo, dichos autores comprobaron que las curvas ROC de las tasas de predicción son bastante similares cuando los valores de probabilidad de los modelos se transforman en susceptibles /no susceptibles.

También, resulta pertinente señalar que durante la investigación bibliográfica realizada, se detectó la ausencia del empleo de los algoritmos de minería de datos en los estudios de riesgos geomorfológicos en México; están ausentes las investigaciones en este campo, donde se obtengan estadísticas AUC con objeto de comparar cuantitativamente resultados obtenidos a nivel regional.

Finalmente, si desde esta perspectiva los resultados alcanzados poseen la suficiente robustez, entonces podrían considerarse como una aportación

[203] Felicísimo, Ángel M., Aurora Cuartero, Juan Remondo and Elia Quirós. "Mapping Landslide Susceptibility with Logistic Regression, Multiple Adaptive Regression Splines, Classification and Regression Trees, and Maximum Entropy Methods: A Comparative Study." *Landslides* 10, no. 2 (2012): 175-189.

metodológica que tal vez otros, más adelante, pudieran emplear para explorar distintos aspectos en esta dirección: el primero, la aplicación cartográfica junto con otros factores causales predictores más la probabilidad temporal de los eventos; el segundo, el uso de modelos de síntesis que incorporen factores disparadores como lluvias extremas, sismos y actividades antrópicas y, el tercero, la comparación con metodologías similares en diferentes regiones.

Bibliografía.

AGS. Guideline for Landslide Susceptibility, Hazard and Risk Zoning for Land Use Management. Australian Geomechanics Society, *Australian Geomechanics* 1: (2007), 42.

Alcántara-Ayala, I. "Landslides: ¿Deslizamientos o Movimientos del Terreno? Definición, Clasificaciones y Terminología." *Investigaciones Geográficas* 41, (2000): 8-25.

Alcántara-Ayala, I. "Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries" *Geomorphology* 47 (2002): 107-124.

Alcántara-Ayala, I. "Hazard Assessment of Rainfall-Induced Landsliding in Mexico." *Geomorphology* 61, no. 1-2 (2004): 19-40.

Alcántara-Ayala, I., O. Esteban-Chávez and J. F., Parrot. "Landsliding Related to Land-Cover Change: A Diachronic Analysis of Hillslope Instability Distribution in the Sierra Norte, Puebla, Mexico." *Catena* 65, no. 2 (2006): 152-165.

Alcántara-Ayala, I., L., Domínguez-Morales, [en línea], "The San Juan de Grijalva Catastrophic Landslide, Chiapas, Mexico: Lessons Learnt", 2008, en: Web Proceedings of The First World Landslide Forum: Tokio, Japón, United Nations University, ICL-International Consortium on Landslides/ISDR-United Nations International Strategy for Disaster Reductions, 96-99. http://www.iclhq.org/WLFweb/parallel_sessions.pdf [Consulta: 10 junio 2013]

Aleotti, P. and R., Chowdhury. "Landslide Hazard Assessment: Summary Review and New Perspectives." *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 58, (1999): 21-44.

Ardizzone, F., M., Cardinali, A., Carrara, F. Guzzetti and P., Reichenbach. "Impact of Mapping Errors on the Reliability of Landslide Hazard Maps." *Natural Hazards and Earth System Sciences* 2, (2002): 3-14.

Atkinson, P. M. and R., Massari. "Generalised Linear Modelling of Susceptibility to Landsliding in the Cental Apennines, Italy." *Computers & Geosciences* 24, no. 4 (1998): 373-385.

Ayalew, L. and Hiromitsu Yamagishi. "The Application of Gis-Based Logistic Regression for Landslide Susceptibility Mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan." *Geomorphology* 65, no. 1-2 (2005): 15-31.

Ayalew, L., Hiromitsu Yamagishi, Hideaki Marui and Takami Kanno. "Landslides in Sado Island of Japan: Part I. Case Studies, Monitoring Techniques and Environmental Considerations." *Engineering Geology* 81, no. 4 (2005a): 419-431.

Ayalew, L., Hiromitsu Yamagishi, Hideaki Marui and Takami Kanno. "Landslides in Sado Island of Japan: Part II. Gis-Based Susceptibility Mapping with Comparisons of Results from Two Methods and Verifications." *Engineering Geology* 81, no. 4 (2005b): 432-445.

Baeza, C. "Evaluación de las condiciones de rotura y la movilidad de los deslizamientos superficiales mediante el uso de técnicas de análisis multivariante". Departamento de Ingeniería del Terreno y Cartográfica ETSECCPB-UPC, 1994

Baeza, C. and J., Corominas. "Assessment of Shallow Landslide Susceptibility by Means of Multivariate Statistical Techniques." *Earth Surface Processes and Landforms* 26, no. 12 (2001): 1251-1263.

Bednarik, M., B., Magulová, M., Matys and M., Marschalko. "Landslide Susceptibility Assessment of the Kral'ovany–Liptovský Mikuláš Railway Case Study." *Physics and Chemistry of the Earth, Parts* A/B/C 35, no. 3-5 (2010): 162-171.

Beven, K. J. and M. J., Kirkby. "A Physically Based, Variable Contributing Area Model of Basin Hydrology". *Hydrological Science Bulletin* 24, (1979): 43–69.

Beguería, S. "Validation and Evaluation of Predictive Models in Hazard Assessment and Risk Management." *Natural Hazards* 37, no. 3 (2006): 315-329.

Brabb, E. "Innovative Approaches to Landslide Hazard and Risk Mapping." In *Proceedings of the 4th International Symposium on Landslides*, 1, 307-323. Toronto, Canada, 1984.

Brenning, A. "Spatial Prediction Models for Landslide Hazards: Review, Comparison and Evaluation." *Natural Hazards and Earth System Sciences* 5, (2005): 853–862.

Brenning, A. and D., Trombotto. "Logistic regression modeling of rock glacier and glacier distribution: Topographic and climatic controls in the semi-arid Andes", *Geomorphology* no. 81, (2006) 141–154.

Brenning, A. "Spatial cross-validation and bootstrap for the assessment of prediction rules in remote sensing: The R package sperrorest", *IEEE Int. Symp. Geosci. Remote S.*, (2012): 5372–5375, doi:10.1109/IGARSS.2012.6352393.

Brenning, A., M., Schwinn, A. P., Ruiz-Páez and J., Muenchow. "Landslide Susceptibility near Highways Is Increased by 1 Order of Magnitude in the Andes of Southern Ecuador, Loja Province." *Natural Hazards and Earth System Science* 15, no. 1 (2015): 45-57.

Bonnard, C. and J., Corominas. "Landslide Hazard Management Practices in the World." *Landslides* 2, no. 4 (2005): 245-246.

Borja-Baeza, R. C. "Análisis de susceptibilidad y riesgo asociado a procesos de remoción en masa en Zacapoaxtla, Puebla." Universidad Nacional Autónoma de México, 2003.

Borja Baeza, R. C. and I., Alcántara-Ayala. "Procesos de remoción en masa y riesgos asociados en Zacapoaxtla, Puebla." *Investigaciones Geográficas*, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, no. 53 (2004): 7-26.

Borja Baeza, R. C. "Inestabilidad de laderas en Tlatlauquitepec, Sierra Norte de Puebla: análisis y modelación en materiales sedimentarios." Universidad Nacional Autónoma de México, 2006.

Borja Baeza, R. C., and I., Alcántara-Ayala. "Susceptibility to mass movement processes in the municipality of Tlatlauquitepec, sierra norte de Puebla." *Investigaciones Geográficas,* Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, no. 73 (2010): 7-21.

Box, George E. P., J., Stuart Hunter and W. G., Hunter. Estadística para Investigadores: Diseño, Innovación y Descubrimiento. Barcelona: Reverté, 2008.

Brunsden, D. "Mass Movement; the Research Frontier and Beyond: A Geomorphological Approach." *Geomorphology* 7, (1993): 85-128.

Cardinali, M., P. Reichenbach, F. Guzzetti, F. Ardizzone, G. Antonini, M. Galli, M. Cacciano, M. Castellani and P. Salvati. "A Geomorphological Approach to the Estimation of Landslide Hazards and Risks in Umbria, Central Italy." *Natural Hazards and Earth System Sciences* 2, (2002): 57–72

Capra, L., Lugo-Hubp, J. and Dávila-Hernández, N. "Fenómenos de remoción en masa en el poblado de Zapotitlán de Méndez, Puebla: Relación entre litología y tipo de movimiento." *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 20, no. 2 (2003): 95-106.

Capra, L., Lugo-Hubp, J. and Borselli, L. "Mass Movements in Tropical Volcanic Terrains: The Case of Teziutlán (México)." *Engineering Geology* 69, no. 3-4 (2003): 359-379.

Capra, L., Lugo-Hubp, J. and Zamorano-Orózco, J. J. "La importancia de la geología en el estudio de los procesos de remoción en masa: El caso de Totomoxtla, Sierra Norte de Puebla, México." *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* LVIII, no. 2 (2006): 205-214.

Carrara, A., Cardinali, M., Detti, R., Guzzetti, F. Pasqui, V. and Reichenbach, P. "Gis Techniques and Statistical Models in Evaluating Landslide Hazard." *Earth Surface Processes and Landforms* 16, (1991).

Carrara, A., Cardinali, M. and Guzzetti, F. "Uncertainty in Assessing Landslide Hazard and Risk." *ITC Journal* 2, (1992): 172-183.

Carrara, A. "Multivariate Models for Landslide Hazard Evaluation." *Mathematical Geology* 15, no. 3 (1983): 403-426.

Catani, F., D. Lagomarsino, S. Segoni and V. Tofani. "Landslide Susceptibility Estimation by Random Forests Technique: Sensitivity and Scaling Issues." *Natural Hazards and Earth System Science* 13, no. 11 (2013): 2815-2831.

Chacón, J., C. Irigaray, T. Fernández and R. El Hamdouni. "Engineering Geology Maps: Landslides and Geographical Information Systems." *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 65, no. 4 (2006): 341-411.

CLICOM. Datos climáticos diarios del CLICOM del SMN con gráficas del CICESE (http://clicom-mex.cicese.mx)

Corominas, J. and Moya, J. "A Review of Assessing Landslide Frequency for Hazard Zoning Purposes." *Engineering Geology* 102, no. 3-4 (2008): 193-213.

Corominas, J., van Westen, C. P. Frattini, L. Cascini, J. P. Malet, S. Fotopoulou, F. Catani, M. Van Den Eeckhaut, O. Mavrouli, F. Agliardi, K. Pitilakis, M. G. Winter, M. Pastor, S. Ferlisi, V. Tofani, J. Hervás and J. T. Smith. "Recommendations for the Quantitative Analysis of Landslide Risk." *Bulletin of Engineering Geology and the Environment,* (2013).

"EM-DAT. The International Disaster Database", Centre for Research on the Epidemiology of Disasters –CRED. http://www.emdat.be/database. [consultado 8 abril 2013.]

Costa, J. E., Schuster, R. L. "The formation and failure of natural dams". *Geological Society American Bulletin* 100, (1988): 1054-1068

Costa, John E. and Robert L. Schuster. *Documented Historical Landslide Dams from around the World*. Vancouver, WA: U.S. Geological Survey, 1991.

Crozier, M. J. Landslides: Causes, Consequences and Environment (Routledge, London, (1989): 252.

Crozier, M. J. and Glade, T., "Landslide Hazard and Risk: Issues, Concepts and Approach" T. Glade, M. Anderson and M.J. Crozier (Editors) *en Landslide hazard and risk*. (John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, England, 2005) 1-40.

Cruden, D. M. "A Simple Definition of a Landslide." Bulletin of the International Association of Engineering Geology - *Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur* 43, no. 1 (1991): 27-29.

Cruden, D. and VanDine, D. F. Classification, Description, Causes and Indirect Effects - Canadian Technical Guidelines and Best Practices Related to Landslides: A National Initiative for Loss Reduction. Geological Survey of Canada, 2013.

Chung, C. F. and Fabbri, A. G. "The representation of geoscience information for data integration". *Nonrenewable Resources* 2 no. 2, (1993):122–139

Chung, Chang-Jo F. and Fabbri, A. G. "Validation of Spatial Prediction Models for Landslide Hazard Mapping." *Natural Hazards* 30, (2003): 451-472

Chung, Chang-Jo F. and Fabbri, A. G. "Systematic Procedures of Landslide Hazard Mapping for Risk Assessment Using Spatial Prediction Models." In Landslide Hazard and Risk, edited by Thomas Glade, Malcolm Anderson and Michael J. Crozier, 139-174: John Wiley & Sons, Ltd, 2004.

Dai, F. C., Lee, C. F., Ngai, Y. Y. "Landslide risk assessment and management: an overview" *Engineering Geology* 64 (2002) 65-87.

Dai, F. C. and C. F. Lee. "A Spatiotemporal Probabilistic Modelling of Storm-Induced Shallow Landsliding Using Aerial Photographs and Logistic Regression." *Earth Surface Processes and Landforms* 28, no. 5 (2003): 527-545.

Dai, F. C., Lee, C. F., Deng, J. H., Tham, L. G. "The 1786 earthquake-triggered landslide dam and subsequent dam-break flood on the Dadu River, southwestern China". *Geomorphology* 65, (2005): 205 -221.

Dai, F. C., C. F. Lee, L. G. Tham, K. C. Ng and W. L. Shum. "Logistic Regression Modelling of Storm-Induced Shallow Landsliding in Time and Space on Natural Terrain of Lantau Island, Hong Kong." *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 63, no. 4 (2004): 315-327.

Dávila-Hernández, N. "Zonificación del peligro por procesos de remoción en masa con base en la aplicación de un análisis estadístico multivariado condicional: la barranca El Calvario, Teziutlán, Puebla: México." Universidad Nacional Autónoma de México, 2003.

Dávila Serrano, M., Jiménez, O., "A geologic study of the Juan del Grijalva landslide, the most important mass movement during the last century in Mexico", *Natural Hazards* 58, (2011): 183-197

Dikau, R., Brunsden, D., Schrott, L and Ibsen, M. eds. Landslide Recognition. Identification, Movement and Causes. Chichester: John Wiley & Sons, 1996.

Dong, Jia-Jyun, Yu-Hsiang Tung, Chien-Chih Chen, Jyh-Jong Liao and Yii-Wen Pan. "Discriminant Analysis of the Geomorphic Characteristics and Stability of Landslide Dams." *Geomorphology* 110, no. 3-4 (2009): 162-171

Einstein, H. H. "Special Lecture: Landslide Risk Assessment Procedure." In Proceedings of the Vth ISL Lausanne, 1075 - 1090. 1988.

Fayyad, U.M., G. Piatetskiy-Shapiro, P. Smith, and U. Ramasasmy. Advances in knowledge discovery and data mining. AAAI Press/MIT Press, 1996.

Fell, R.; Corominas, J.; Bonnard, C.; Cascini, L.; Leroi, E. & Savage, W. Z. "Guidelines for Landslide Susceptibility, Hazard and Risk Zoning for Land Use Planning." *Engineering Geology* 102 (2008): 85-98.

Felicísimo, Á. M. "Aplicaciones de los Modelos Digitales del Terreno en las Ciencias Ambientales." Universidad de Oviedo, 1992.

Felicísimo, Á. M., Cuartero, A., Remondo, J. and Quirós, E. "Mapping Landslide Susceptibility with Logistic Regression, Multiple Adaptive Regression Splines, Classification and Regression Trees, and Maximum Entropy Methods: A Comparative Study." *Landslides* 10, no. 2 (2012): 175-189.

Flores-Lorenzo, P. "Inestabilidad de las laderas y riesgos asociados en Teziutlán, Puebla: México." Universidad Nacional Autónoma de México, 2002.

Flores-Lorenzo, P. and Alcántara-Ayala, I. "Cartografía morfogenética e identificación de procesos de ladera en Teziutlán, Puebla." *Investigaciones Geográficas*, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, no. 49 (2002): 7-26.

Frattini, P., Crosta, G., and Carrara, A. "Techniques for Evaluating the Performance of Landslide Susceptibility Models." *Engineering Geology* 111, no. 1-4 (2010): 62-72.

Glade. T. "Establishing the frequency and magnitude of landslide-triggering rainstorm events in New Zeland". *Environmental Geology*,35 (1998): 160-174.

Gokceoglu, C.; Sezer, E. "A statistical assessment on international landslide literature (1945–2008)" *Landslides* 6 (2009): 345-351.

Guthrie, R. H. and Evans, S. G. "Work, Persistence, and Formative Events: The Geomorphic Impact of Landslides." *Geomorphology* 88, no. 3-4 (2007): 266-275.

Guzzetti, F., Carrara, A. Cardinali, M. and Reichenbach, P. "Landslide Hazard Evaluation: A Review of Current Techniques and Their Application in a Multi-Scale Study, Central Italy." *Geomorphology* 31, (1999): 181-216.

Guzzetti, F. "Landslide Hazard and Risk Assessment." RHEINISCHEN FRIEDRICH-WILHELMS-UNIVESTITÄT BONN, 2005.

Guzzetti, F, Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M. and Ardizzone, F. "Probabilistic Landslide Hazard Assessment at the Basin Scale." *Geomorphology* 72, no. 1-4 (2005): 272-299.

Han, Jiawei and Micheline, K. Data Mining: Concepts and Techniques. Morgan Kaufmann Series, 2000.

Hansen, A. "Landslide Hazard Analysis." In Slope Instability, edited by D. Brunsden and D.B Prior, 523-602. Chichester: Wiley, Interscience, 1984.

He, Sanwei, Peng Pan, Lan Dai, Haijun Wang and Jiping Liu. "Application of Kernel-Based Fisher Discriminant Analysis to Map Landslide Susceptibility in the Qinggan River Delta, Three Gorges, China." *Geomorphology* 171-172, (2012): 30-41

Hernández-Mena, Z. "Estudio geológico y geotécnico del deslizamiento Zapotitlán de Méndez ubicado en la Sierra Norte del estado de Puebla: México." Universidad Nacional Autónoma de México. 2002

Hernández-Mena, Z. "Mapa de susceptibilidad a procesos de remoción en masa con base en análisis multivariado: la región de Zapotitlán de Méndez, Puebla." Universidad Nacional Autónoma de México, 2008.

Hernández-Santana, J. R., Bollo Manent, M., Méndez Linares, A. P. and Figueroa Mah Eng, J. M. "Formación y morfogénesis del relieve del extremo noroccidental del estado de Chiapas, México." *Investigaciones Geográficas*, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, no. 68 (2009): 25-40.

Hernández-Santana, J. R., Lugo-Hubp, J., Ortiz-Pérez, M. A. "Morfoestructuras Regionales, NA III 1." En Geomorfología. Ciudad de México: Instituto de Geografía, UNAM, 2007.

Hernández-Madrigal V., Mora-Chaparro, J., Garduño-Monroy, V. "Large block slide at San Juan Grijalva, Northwest Chiapas, Mexico". *Landslides* 8, (2011): 109-115

Hernández J., Ramírez M. J. y Ferri C. Introducción a la Minería de Datos. Pearson Educación. Editorial Pearson Prentice Madrid, España. 2004

Hinojosa-Corona, A., Rodríguez-Moreno, V. M., Munguía-Orozco, L., Meillón-Menchaca, O. "El deslizamiento de ladera de noviembre 2007 y generación de una presa natural en el río Grijalva, Chiapas, México", *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 63, no. 1, (2011): 15-38.

Hoek, E. and J.W Bray. "Strengtht of rock and rock masses". *International Society for Rock Mechanics News Journal*, 2(2) (1994):4-16.

Hoek, E. & E. T. Brown. "Estimación de la resistencia de macizos rocosos en la práctica". Primer Taller Geotecnico Interdivisional, Division Chuquicamata de Codelco – Chile. La Serena, 2 - 4 de julio de 1997

Hong, Y., Adler, R.F., Huffman, G. "An Experimental Global Prediction System for Rainfall-Triggered Landslides Using Satellite Remote Sensing and Geospatial Datasets". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 45, (2007): 1671-1680.

IAEG-Commission on Landslides. "Suggested nomenclature for landslides". 1990. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology - Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur* 41, (1990):13-16.

ICOLD, Reservoir landslides: Investigation and management. Guidelines and case histories. International Commission on Large Dams. (Paris, France, 2002)

IUGS-Working group on landslide. "A suggested method for describing the rate of movement of a landslide". *Bulletin of the International Association of Engineering Geology* 52, (1995): 75-78.

IUGS-Working group on landslide. "A suggested method for reporting landslide remedial measures" *Bulletin of Engineering Geology and Environment* 60, (2001): 69-74.

Jaafari, A., Najafi, A., Pourghasemi, H. R., Rezaeian. J., and Sattarian, A., "GIS-based frequency ratio and index of entropy models for landslide susceptibility assessment in the Caspian forest, northern Iran". *International Journal of Environmental Science and Technology,* (2013), DOI: 10.1007/s13762-013-0464-0.

Juárez Badillo, E. and Rico Rodríguez, A. Mecánica de Suelos. Tomo 1. 2 vols. México D. F.: Rabasa, 2004.

Kojima, H. and Obayashi, S. "An Inverse Analysis of Unobserved Trigger Factor for Slope Stability Evaluation." Computers & Geosciences 32, no. 8 (2006): 1069-1078.

Korup, O. "Geomorphic Hazard Assessment of Landslide Dams in South Westland, New Zealand: Fundamental Problems and Approaches." *Geomorphology* 66, no. 1-4 (2005): 167-188.

Lee, S., Choi, J. and Min, K. "Landslide Susceptibility Analysis and Verification Using the Bayesian Probability Model." *Environmental Geology* 43, no. 1-2 (2002): 120-131.

Lee, S. "Application of Likelihood Ratio and Logistic Regression Models to Landslide Susceptibility Mapping Using Gis." *Environmental Management* 34, no. 2 (2004): 223-232.

Lee, S. "Application of Logistic Regression Model and Its Validation for Landslide Susceptibility Mapping Using Gis and Remote Sensing Data." *International Journal of Remote Sensing* 26, no. 7 (2005): 1477-1491.

Lee, S. and Talib, J. A. "Probabilistic Landslide Susceptibility and Factor Effect Analysis." *Environmental Geology* 47, no. 7 (2005): 982-990.

Lee, S. "Application and Verification of Fuzzy Algebraic Operators to Landslide Susceptibility Mapping." *Environmental Geology* 52, no. 4 (2006): 615-623.

Long, N.T. "Landslide susceptibility mapping of the mountainous area in A Luoi district, Thua Thien Hue province, Vietnam". Faculty of Engineering, Department of Hydrology and Hydraulic Engineering, Vrije Universiteit Brussel, Belgium, (2008)

Lugo-Hubp, J., Vázquez-Conde, M. T., Melgarejo-Palafox, G., García-Jiménez, F. and Matías-Ramírez, G. "Procesos gravitacionales en las montañas de Puebla." *Ciencia y desarrollo* 27, no. 157 (2001): 24-33.

Lugo-Hubp, J., Zamorano-Orozco, J., Capra, Inbar, L. M. and Alcántara-Ayala, I. "Los procesos de remoción en masa en la Sierra Norte de Puebla, octubre de 1999: causas y efectos." *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 22, no. 2 (2005): 212-228.

Malamud, B. D., Turcotte, D. L., Guzzetti, F. and Reichenbach, P. "Landslide Inventories and Their Statistical Properties." *Earth Surface Processes and Landforms* 29, no. 6 (2004): 687-711.

Marcos-López, J. "Distribución espacial de los procesos de remoción en masa y riesgos asociados en el municipio de Tlatlauquitepec, Puebla: México." Universidad Nacional Autónoma de México, 2003.

Marengo-Mogollón, H., [en línea] "Deslizamiento de tierra y roca que obstruyó el río Grijalva". 2008. Comisión Federal de Electricidad, Colegio de Ingenieros Civiles de México, http://ingenet.com.mx/noticias/?p=2841, [Consulta: 10 junio 2013]

Mena, Enrique, "Comunicación personal", Subgerente de Seguridad Estructural, Comisión Federal de Electricidad, [febrero de 2012].

Mondini, A. C., Marchesini, I., Rossi, M., Chang, K. T., Pasquariello, G. and Guzzetti, F. "Bayesian Framework for Mapping and Classifying Shallow Landslides Exploiting Remote Sensing and Topographic Data." *Geomorphology* 201, (2013): 135-147.

Mota Corro, J. "El año pasado el Cupreder advirtió sobre peligros en deslaves", jueves 5 de julio de 2107 La Jornada de Oriente, Puebla. http://www.lajornadadeoriente.com.mx/2007/07/05/puebla/pue402.php. [consultado 8 abril 2013.]

Montgomery, D. R. and Dietrich, W. E. "A physically model for the topographic control on shallow landsliding". *Water Resources Research* 30 (4) (1994): 1153-1171.

Mooser, F., Montiel, J. A., Zúñiga, A. Nuevo mapa geológico de las Cuencas de México, Toluca y Puebla. Estratigrafía, tectónica regional y aspectos geotérmicos. CFE, México, 1996.

Muñoz, J. and Felicísimo, A. M. "Comparison of Statistical Methods Commonly Used in Predictive Modelling." *Journal of Vegetation Science* 15, (2004): 285-292.

Ochoa-Tejeda, V. "Propuesta metodológica para el estudio de inestabilidad de laderas a partir de los MDT y la percepción remota: México." Universidad Nacional Autónoma de México, 2004.

Ochoa-Tejeda, V. and Parrot, J. F. "Extracción automática de trazas de deslizamientos utilizando un modelo digital de terreno e imágenes de satélite de alta resolución Ikonos. Ejemplo en la Sierra Norte de Puebla, México." *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 24, no. 3 (2007): 354-367.

Ochoa-Tejeda, V. "Control estructural de la inestabilidad de laderas: modelación tridimensional de los rasgos geológicos: aplicación al estudio de los procesos de remoción en masa de la Soledad, Sierra Norte de Puebla, México " Universidad Nacional Autónoma de México, 2009.

Ohlmacher, G. C. and Davis, J. C. "Using Multiple Logistic Regression and Gis Technology to Predict Landslide Hazard in Northeast Kansas, USA." *Engineering Geology* 69, no. 3-4 (2003): 331-343.

Ohlmacher, G. C. "Plan Curvature and Landslide Probability in Regions Dominated by Earth Flows and Earth Slides." *Engineering Geology* 91, no. 2-4 (2007): 117-134.

Organización de Naciones Unidas, "Hyogo Framework for Action 2005-2015: Building the Resilience of Nations and Communities to Disasters". (Kobe, Hyogo, Japan 2005).

Organización de Naciones Unidas, "Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres. La gestión del riesgo de desastres hoy: Contextos globales, herramientas locales". 2008

Popescu, M. E., "Landslide causal factors and landslide remedial options". Keynote lecture Proceedings 3rd international conference on landslide, slope stability and safety of infrastructures, Singapore, (2002): 61-81.

Regmi, A. D., Devkota, K. C., Yoshida, K., Pradhan, B., Pourghasemi, H. R., Kumamoto, T. and Akgun, A. "Application of Frequency Ratio, Statistical Index, and Weights-of-Evidence Models and Their Comparison in Landslide Susceptibility Mapping in Central Nepal Himalaya." *Arabian Journal of Geosciences* 7, no. 2 (2013): 725-742.

Riemer, W. "Landslides and reservoirs. Keynote Papers". 1992, En: Proceedings 6th International Symposium on Landslides, Christchurch, pp 1973 – 2004.

Rowbotham, D. and Dudycha, D. N. "Gis Modelling of Slope Stability in Phewa Tal Watershed, Nepal." *Geomorphology* 26, (1998): 151– 170.

Schuster, R. L. and Costa, J. E. "A Perspective on Landslide Dams." In Landslide Dams: Process, Risk and Mitigation, edited by Robert L. Schuster, 1-20: *ASCE Geotechnical Special Publication*, 1986.

Schuster, R. L., Nieto, A. S., O'Rourke, T. D., Crespo, E., Plaza Nieto, G. "Mass wasting triggered by the 5 March 1987 Ecuador earthquakes" *Engineering Geology* 42 (1996) 1-23.

Schuster, R. L. "Risk-Reduction Measures for Landslide Dams." *Italian Journal of Engineering Geology and Environment* 1, (2006): 9-13.

Semenza, E., Ghirtotti, F. D. "History of the 1963, Vaiont Slide: the importance of geological factors". *Bulletin of Engineering Geology and Environment* 59, (2000): 87-97.

Selby, M. J. Controls on the stability and inclinations of hillslopes formed on hard rock. *Earth Surface Processes and Landforms*, 7 (1982): 449-467.

Servicio Geológico Mexicano, "Léxico Estratigráfico de México" http://www.sgm.gob.mx/Lexico_Es/default.html (accessed 15 de marzo 2012).

Steger, S., Alexander Brenning, A., Bell, R., Petschko, H. and Glade, T. "Exploring Discrepancies between Quantitative Validation Results and the Geomorphic Plausibility of Statistical Landslide Susceptibility Maps." *Geomorphology* 262, (2016): 8-23.

Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). Monitoreo satelital. 2016.

Soeters, R. and van Westen, C. J. "Slope Instability Recognition, Analysis, and Zonation." In Landslides: Investigation and Mitigation, edited by A. K. Turner and R. L. Schuster, 129-177. Washington, D.C.: National Research Council, 1996.

Süzen, M. L. and Doyuran, V. "A Comparison of the Gis Based Landslide Susceptibility Assessment Methods: Multivariate Versus Bivariate." *Environmental Geology* 45, no. 5 (2004): 665-679.

Thornthwaite, C. W. "An Approach toward a Rational Classification of Climate." *Geographical Review* 38, (1948): 55-94.

UNESCO-WP/WLI. Multilingual Landslide Glossary. 1993. Bitech Publishers Ltd, Richmond, p 34.

UNESCO-WP/WLI. "A suggested method for reporting landslide causes". Bulletin of the International Association of Engineering Geology - Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur 50, (1994): 71-74.

Varnes, D. J. Landslide Hazard Zonation: A Review of Principles and Practice. UNESCO, 1984.

Van Westen C. J. (1993). Application of Geographical Information System to landslide hazard zonation. ITC Publication no. 15, ITC, Enschede, The Netherlands, 245 pp.

Van Westen, C. J., Castellanos, E. and Kuriakose, S. L. "Spatial Data for Landslide Susceptibility, Hazard, and Vulnerability Assessment: An Overview." *Engineering Geology* 102, no. 3-4 (2008): 112-131.

Van Westen, C. J., van Asch, T. W. J., & Soeters, R. "Landslide hazard and risk zonation—why is it still so difficult?" *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 6 (2006): 167–184.

Vorpahl, P., Elsenbeer, H., Märker, M. and Schröder, B.. "How Can Statistical Models Help to Determine Driving Factors of Landslides?" Ecological Modelling 239, (2012): 27-39.

Wang, Qiqing, Wenping Li, Yanli Wu, Yabing Pei and Peng Xie. "Application of Statistical Index and Index of Entropy Methods to Landslide Susceptibility

Assessment in Gongliu (Xinjiang, China)." *Environmental Earth Sciences* 75, no. 7 (2016) DOI 10.1007/s12665-016-5400-4.

Xu, Wenbo, Shaocai Jing, Wenjuan Yu, Zhaoxian Wang, Guoping Zhang and Jianxi Huang. "A Comparison between Bayes Discriminant Analysis and Logistic Regression for Prediction of Debris Flow in Southwest Sichuan, China." *Geomorphology* 201, (2013): 45-51.

Yee, T. W. and Mitchell, N. D. "Generalized additive models in plant ecology". Journal of Vegetation Science 2, (1991): 587-602.

Yesilnacar, E. and Topal, T. "Landslide Susceptibility Mapping: A Comparison of Logistic Regression and Neural Networks Methods in a Medium Scale Study, Hendek Region (Turkey)." *Engineering Geology* 79, no. 3-4 (2005): 251-266.

Yilmaz, I. "Comparison of Landslide Susceptibility Mapping Methodologies for Koyulhisar, Turkey: Conditional Probability, Logistic Regression, Artificial Neural Networks, and Support Vector Machine." *Environmental Earth Sciences* 61, no. 4 (2009): 821-836.

Youssef, A. M., Al-Kathery, M. and Pradhan, B. "Landslide Susceptibility Mapping at Al-Hasher Area, Jizan (Saudi Arabia) Using Gis-Based Frequency Ratio and Index of Entropy Models." *Geosciences Journal* 19, no. 1 (2014): 113-134.

Zêzere, J. L., Reis, E., Garcia, R., Oliveira, S., Rodrigues, M.L., Vieira, G., Ferreira, A.B. "Integration of spatial and temporal data for the definition of different landslide hazard scenarios in the area north of Lisbon (Portugal)". *Natural Hazards and Earth System Sciences* 4 (2004): 133- 146.

Zhu, A. Xing, Rongxun Wang, Jianping Qiao, Cheng-Zhi Qin, Yongbo Chen, Jing Liu, Fei Du, Yang Lin and Tongxin Zhu. "An Expert Knowledge-Based Approach to Landslide Susceptibility Mapping Using Gis and Fuzzy Logic." *Geomorphology* 214, (2014): 128-138.