



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Ingeniería Geotécnica

**ANÁLISIS DE CAMBIO Y USO DE SUELOS, AL NOROESTE DE LA CIUDAD DE
GUATEMALA, EMPLEANDO IMÁGENES SATELITALES ANTE LA VULNERABILIDAD DE
DESLIZAMIENTOS EN LADERAS**

Ing. José Ramón López López

Asesorado por el MSc. Víctor Manuel López Juárez

Guatemala, septiembre 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DE CAMBIO Y USO DE SUELOS, AL NOROESTE DE LA CIUDAD DE
GUATEMALA, EMPLEANDO IMÁGENES SATELITALES ANTE LA VULNERABILIDAD DE
DESLIZAMIENTOS EN LADERAS**

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

ING. JOSÉ RAMÓN LÓPEZ LÓPEZ

ASESORADO POR

MSC. ING. VÍCTOR MANUEL LÓPEZ JUÁREZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTÉCNICA

GUATEMALA, SEPTIEMBRE 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE LA JUNTA DIRECTIVA

| | |
|------------|--------------------------------------|
| DECANA | Ing. Aurelia Anabela Cordova Estrada |
| VOCAL I | Ing. José Francisco Gómez Rivera |
| VOCAL II | Ing. Mario Renato Escobedo Martínez |
| VOCAL III | Ing. José Milton de León Bran |
| VOCAL IV | Br. Christian Moisés de la Cruz Leal |
| VOCAL V | Br. Kevin Armando Cruz Lorente |
| SECRETARIO | Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez |

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

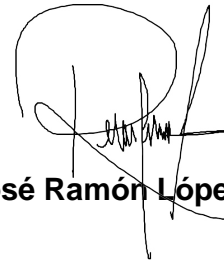
| | |
|------------|---|
| DECANA | Mstra. Ing. Aurelia Anabela Cordova Estrada |
| DIRECTOR | M.Sc. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí |
| EXAMINADOR | M.Sc. Ing. Armando Fuentes Roca |
| EXAMINADOR | Dr. Ing. Nick Kenner Estrada Orozco |
| SECRETARIO | Mstro. Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez |

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ANÁLISIS DE CAMBIO Y USO DE SUELOS, AL NOROESTE DE LA CIUDAD DE GUATEMALA, EMPLEANDO IMÁGENES SATELITALES ANTE LA VULNERABILIDAD DE DESLIZAMIENTOS EN LADERAS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Postgrado de la Facultad de Ingeniería, con fecha 30 de octubre de 2018.



Ing. José Ramón López López

DTG. 391.2020.

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **ANÁLISIS DE CAMBIO Y USO DE SUELOS, AL NOROESTE DE LA CIUDAD DE GUATEMALA, EMPLEANDO IMÁGENES SATELITALES ANTE LA VULNERABILIDAD DE DESLIZAMIENTOS EN LADERAS**, presentado por el Ingeniero **José Ramón López López**, estudiante de la **Maestría en Ciencias en Ingeniería Geotécnica** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
DECANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
★

Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana

Guatemala, noviembre de 2020.

AACE/asga



Guatemala, Noviembre de 2020

EEPFI-1388-2020

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y verificar la aprobación del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística al Trabajo de Graduación titulado: **“ANÁLISIS DE CAMBIO Y USO DE SUELOS, AL NOROESTE DE LA CIUDAD DE GUATEMALA, EMPLEANDO IMÁGENES SATELITALES ANTE LA VULNERABILIDAD DE DESLIZAMIENTOS EN LADERAS”** presentado por el Ingeniero **José Ramón López López** quien se identifica con Carné **200312952** correspondiente al programa de **Maestría en Ciencias en Ingeniería en Geotécnica**; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”



Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala



ESCUELA DE ESTUDIOS DE
POSTGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA

Guatemala, Noviembre de 2020

EEPTI-1387-2020

Como Coordinador de la **Maestría en Ciencias en Ingeniería Geotécnica** doy el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **"ANÁLISIS DE CAMBIO Y USO DE SUELOS, AL NOROESTE DE LA CIUDAD DE GUATEMALA, EMPLEANDO IMÁGENES SATELITALES ANTE LA VULNERABILIDAD DE DESLIZAMIENTOS EN LADERAS"** presentado por el Ingeniero **José Ramón López López** quien se identifica con Camé **200312952**.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

Mtro. Ing. Armando Fuetes Roca
Coordinador de Maestría
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

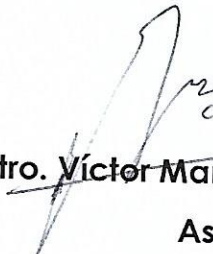
Guatemala, Noviembre de 2020

EEPM-1389-2020

En mi calidad como Asesor del Ingeniero José Ramón López López, quien se identifica con Carné 200312952, procedo a dar el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: "ANÁLISIS DE CAMBIO Y USO DE SUELOS, AL NOROESTE DE LA CIUDAD DE GUATEMALA, EMPLEANDO IMÁGENES SATELITALES ANTE LA VULNERABILIDAD DE DESLIZAMIENTOS EN LADERAS", quien se encuentra en el programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Geotécnica en la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"


Víctor Manuel López Juárez
INGENIERO CIVIL, M. S.
Col. 2,393
Mtro. Víctor Manuel López Juárez
Asesor

ACTO QUE DEDICO A:

- Mi madre** Norma Emilia López Barrios, (q. d. e. p.) por darme la vida, tu amor, dedicación y paciencia. Infinitas gracias por tus sabios consejos, por acompañarme y desearme en todo momento lo mejor. Este triunfo también es tuyo.
- Mi padre** Ramón López Díaz, (q. d. e. p.) por su amor y dedicación. Por sus sabios consejos e inspiración a seguir adelante
- Mi hermana** María Cristina López, por la alegría y apoyo. En mi corazón estarás por siempre.
- Mi familia** Por todo el apoyo y cariño que me han brindado. Que Dios los siga bendiciendo.
- Mis amigos** Lautaro Palacios, Edvin Salvador Valenzuela y Mario Rolando Velásquez Chen por su amistad, apoyo y cariño.

AGRADECIMIENTOS A:

Yahveh

Todopoderoso, gracias por permitirme concretar sueño, ser mi protector en todo momento. A ti Olam gracias.

Universidad de San Carlos de Guatemala

Mi *alma mater*.

Escuela de Postgrados

Por compartir sus valiosos conocimientos.

Mis catedráticos

Por su excelente aporte académico.

MSc. Ing. Víctor López

La dedicación y paciencia, en transmitir la experiencia profesional.

Todas las personas

Que me proporcionaron su para la elaboración del presente trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|-------|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES..... | VII |
| LISTA DE SÍMBOLOS..... | XIII |
| GLOSARIO..... | XV |
| INTRODUCCIÓN..... | XXIII |
| ANTECEDENTES..... | XXVII |
| PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | XXXI |
| JUSTIFICACIÓN..... | XXXV |
| OBJETIVOS..... | XXXIX |
| ALCANCES..... | XLI |
| HIPÓTESIS..... | XLIII |
| RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO..... | XLV |
| | |
| 1. CONCEPTOS Y PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DIGITALES OBTENIDOS A TRAVÉS DE SENSORES REMOTOS..... | 1 |
| 1.1. Selección de los parámetros de control..... | 2 |
| 1.1.1. Identificación de la amenaza..... | 3 |
| 1.1.2. Determinación de la vulnerabilidad..... | 4 |
| 1.1.3. Características para los escenarios de riesgos..... | 4 |
| 1.1.4. Puntos de recolección de muestras..... | 5 |
| 1.1.5. Procesamiento para las imágenes digitales..... | 5 |
| 1.1.6. Preprocesamiento..... | 6 |
| 1.1.7. Realce..... | 6 |
| 1.1.8. Filtrado espacial..... | 7 |
| 1.1.9. Análisis de las firmas espectrales..... | 8 |

| | | |
|---------|--|----|
| 1.1.10. | Clasificación para un análisis multitemporal, para un período de diez años | 10 |
| 1.1.11. | Identificación de clases..... | 11 |
| 1.1.12. | Clasificación supervisada | 12 |
| 1.1.13. | Clasificación no supervisada | 12 |
| 1.1.14. | Obtención de las muestras | 12 |
| 1.1.15. | Algoritmo para la clasificación | 13 |
| 1.1.16. | Estudio de suelos empleando sensores remotos.... | 13 |
| 1.1.17. | Mapas temáticos | 15 |
| 1.1.18. | Análisis y procesamiento de imágenes por sensores remotos | 16 |
| 1.1.19. | Proceso de registro de información satelital | 20 |
| 1.1.20. | Interacción de la energía con la corteza terrestre y su clasificación de la firma espectral..... | 22 |
| 1.1.21. | Características para la visualización de una imagen satelital | 26 |
| 1.1.22. | Imágenes satelitales gratuitas | 28 |
| 1.1.23. | Características ambientales y escala para su medición..... | 31 |
| 1.2. | Riesgo, amenaza y susceptibilidad | 35 |
| 1.2.1. | Análisis de riesgos..... | 35 |
| 1.2.2. | Análisis cualitativo | 35 |
| 1.2.3. | Análisis cuantitativo | 36 |
| 1.2.4. | Procesos para una imagen digital a partir de sensores remotos | 36 |
| 1.2.5. | Procesos para la susceptibilidad a deslizamientos | 37 |
| 1.2.6. | Evaluación directa | 38 |
| 1.2.7. | Modelos cartográficos | 38 |

| | | |
|---------|--|----|
| 1.2.8. | Métodos probabilísticos | 39 |
| 1.2.9. | Métodos deterministas | 39 |
| 1.2.10. | Método de Mora – Vahrson..... | 39 |
| 1.3. | Geología..... | 40 |
| 1.3.1. | Geología regional..... | 40 |
| 1.3.2. | Rasgos hidrológicos regionales | 42 |
| 1.3.3. | Aspectos sísmicos | 43 |
| 1.3.4. | Suelos..... | 46 |
| 1.3.5. | Características del suelo..... | 49 |
| 1.3.6. | Descripción de la geomorfología del área de estudio | 50 |
| 1.3.7. | Ubicación | 53 |
| 1.3.8. | Geología local..... | 54 |
| 1.3.9. | Barrancos identificados en el valle | 58 |
| 1.3.10. | Unidades hidrogeológicas..... | 59 |
| 1.3.11. | Depósitos volcánicos cuaternarios..... | 60 |
| 1.3.12. | Sedimentos fluvial - lacustres..... | 60 |
| 1.3.13. | Lavas volcánicas del terciario | 61 |
| 1.3.14. | Calizas del cretácico | 62 |
| 1.3.15. | Clima | 62 |
| 1.3.16. | Precipitación | 63 |
| 1.3.17. | Características de la cuenca del río Motagua | 66 |
| 2. | METODOLOGÍA PARA ANÁLISIS DEL CAMBIO Y USO DE SUELOS, EMPLEANDO IMÁGENES SATELITALES | 69 |
| 2.1. | Clasificación imagen satelital..... | 69 |
| 2.1.1. | Verificación de la separabilidad espectral | 71 |
| 2.1.2. | Clasificación distancia mínima | 72 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 2.1.3. | Posclasificación de una imagen digital con la matriz de confusión | 73 |
| 2.1.4. | Filtrado de mayoría..... | 75 |
| 2.1.5. | Procesamiento de imágenes satelitales..... | 75 |
| 2.1.6. | Corrección atmosférica..... | 76 |
| 2.1.7. | Emisividad de la superficie terrestre | 76 |
| 2.1.8. | Eliminación de bandeo, reflectancia y nubes, para el sensor remoto Landsat 7 | 77 |
| 2.1.9. | Corrección bandeo de imágenes Landast..... | 77 |
| 2.1.10. | Procesamiento para corrección de franjas negras .. | 78 |
| 2.1.11. | Calibración de imágenes digitales Landsat para un análisis multitemporal | 80 |
| 2.1.12. | Procesamiento para corrección de la reflectancia .. | 82 |
| 2.1.13. | Procesamiento para eliminación de nubes | 88 |
| 2.1.14. | Tasa anual de cambio | 89 |
| 2.1.15. | Valor índice Kappa | 90 |
| 2.2. | Aplicación de la metodología para Mora-Vahrson | 91 |
| 2.2.1. | Parámetro de pendiente (SP) | 93 |
| 2.2.2. | Valores de disparo por lluvia (DII)..... | 93 |
| 2.2.3. | Valores asignados promedio de lluvia mensual | 94 |
| 2.2.4. | Valores asignados para la humedad del terreno (Sh) | 97 |
| 2.2.5. | Valores de disparo de sismicidad (Ds)..... | 97 |
| 2.2.6. | Valores de susceptibilidad litológica (SI)..... | 98 |
| 2.2.7. | Clasificación de la litología e interpretación, aplicando la metodología de Mora – Vahrson..... | 99 |
| 2.3. | Caracterización geotécnica de los materiales | 100 |
| 2.3.1. | Resistencia cortante de los suelos | 101 |
| 2.3.2. | Presión total (σ)..... | 101 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 2.3.3. | Presión efectiva (σ') | 102 |
| 2.3.4. | Intersticial (μ) | 102 |
| 2.3.5. | Cohesión y ángulo de rozamiento interno | 102 |
| 2.3.6. | Resistencia residual | 103 |
| 2.3.7. | Corte directo | 103 |
| 3. | RESULTADOS MEDIANTE EL EMPLEO DE IMÁGENES SATELITALES | 105 |
| 3.1. | Análisis multitemporal para el valle de la ciudad de Guatemala | 105 |
| 3.1.1. | Análisis multitemporal para el caso de estudio | 122 |
| 3.1.2. | Generación de DEM de mapa de pendientes | 137 |
| 3.2. | Resultados de la aplicación del método de Mora-Vahrson | 141 |
| 3.3. | Emplazamiento | 142 |
| 3.3.1. | Localización del área de estudio | 142 |
| 3.3.2. | Geología en la colonia El Incienso | 143 |
| 3.3.3. | Índice de sismicidad para la zona El Incienso | 146 |
| 3.3.4. | Corte directo de muestras en taludes sobre El Incienso | 147 |
| 4. | DISCUSIÓN DE RESULTADOS MEDIANTE EL EMPLEO DE IMÁGENES SATELITALES | 149 |
| 4.1. | Resultados de las imágenes digitales | 149 |
| 4.2. | Interpretación de Mora – Vahrson | 154 |
| 4.3. | Interpretación de los ensayos de laboratorio para corte directo | 158 |

CONCLUSIONES 159
RECOMENDACIONES 161
REFERENCIAS..... 163
ANEXOS 187

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

| | | |
|-----|---|----|
| 1. | Etapas para la elaboración de un mapa de riesgos | 2 |
| 2. | Mejora de brillo de una imagen digital | 7 |
| 3. | Operación para asignación de valores de un píxel | 8 |
| 4. | Diagrama de flujo para el análisis de componentes principales..... | 9 |
| 5. | Diagrama de flujo para un análisis multitemporal | 11 |
| 6. | Valores de reflectancia de suelos..... | 14 |
| 7. | Representación de mapas temáticos | 15 |
| 8. | Proceso de recopilación para procesar imágenes satelitales | 21 |
| 9. | Niveles energéticos moleculares | 23 |
| 10. | Frecuencias y longitudes de onda, correspondiente al espectro electromagnético | 24 |
| 11. | Representación del espectro electromagnético en la región de la luz visible | 25 |
| 12. | Comparación de una imagen satelital, vector y ráster | 27 |
| 13. | Obtención de imagen digital a través de sensores remotos | 29 |
| 14. | Características de distintos satélites dedicados a la teledetección | 30 |
| 15. | Imagen satelital en alta resolución Landsat, ciudad de Guatemala | 31 |
| 16. | Combinación de bandas RGB para Landsat 8 | 32 |
| 17. | Escala para mediciones de imágenes satelitales | 34 |
| 18. | Modelos para el proceso de mapas de susceptibilidad | 38 |
| 19. | Placa tectónica en que se fragmenta la corteza terrestre | 41 |
| 20. | Formación geológica territorio nacional..... | 42 |
| 21. | Ubicación de frecuencia y eventos sísmicos | 44 |

| | | |
|-----|--|----|
| 22. | Zonificación sísmica | 45 |
| 23. | Mapa de reconocimiento de suelos de la ciudad de Guatemala | 48 |
| 24. | Resultados obtenidos en los ensayos para el suelo | 49 |
| 25. | Valle de la ciudad de Guatemala | 50 |
| 26. | Perfil de terreno ocupado en asentamientos, en la ciudad de Guatemala | 52 |
| 27. | Geología para la interpretación de la estructura del valle de Guatemala (1:250,000) | 55 |
| 28. | Interpretación geomorfológica del valle de Guatemala | 56 |
| 29. | Esquema de fracturas elaborado a partir del terremoto de 1976 en el valle de Guatemala (1:250,000) | 57 |
| 30. | Morfología del valle de la ciudad de Guatemala | 59 |
| 31. | Precipitación promedio mensual área de influencia | 64 |
| 32. | Mapa de isoyetas del valle de la ciudad de Guatemala | 65 |
| 33. | Cuencas y localización de ríos en la ciudad de Guatemala | 67 |
| 34. | Reflectancia para una clasificación supervisada | 71 |
| 35. | Separabilidad espectral en imágenes obtenidas por medio de sensores remotos | 72 |
| 36. | Imagen digital empleando metodología distancia mínima para su clasificación | 73 |
| 37. | Imagen clasificada (derecha) y filtrado por mayoría (derecha) | 75 |
| 38. | Imagen Landsat 7 ciudad de Guatemala | 78 |
| 39. | Eliminación de franjas negras de imagen digital | 79 |
| 40. | Eliminación de franjas negras en una imagen digital | 80 |
| 41. | Identificación de los atributos de la imagen digital | 81 |
| 42. | Selección de una imagen multispectral para su calibración | 83 |
| 43. | Parametrización del caso de estudio puente El Incienso, empleando una imagen Landsat | 84 |

| | | |
|-----|--|-----|
| 44. | Configuración para la corrección atmosférica del modelo digital con la herramienta flaash..... | 86 |
| 45. | Firma espectral en una imagen digital..... | 87 |
| 46. | Parametrización de valores de reflectancia..... | 88 |
| 47. | Creación de una máscara para eliminación de nubes y sombras..... | 89 |
| 48. | Precipitación máxima mensual..... | 95 |
| 49. | Imágenes Landsat 7 año 2009 – 2013..... | 106 |
| 50. | Imágenes Landsat 8 año 2014 – 2018..... | 107 |
| 51. | Análisis multitemporal empleando sensores remotos, para la ciudad de Guatemala..... | 110 |
| 52. | Procesamiento de imagen digital Landsat 7 año 2009..... | 112 |
| 53. | Procesamiento de imagen digital Landsat 7 año 2010..... | 113 |
| 54. | Procesamiento de imagen digital Landsat 7 año 2011..... | 114 |
| 55. | Procesamiento de imagen digital Landsat 7 año 2012..... | 115 |
| 56. | Procesamiento de imagen digital Landsat 7 año 2013..... | 116 |
| 57. | Procesamiento de imagen digital Landsat 8 año 2014..... | 117 |
| 58. | Procesamiento de imagen digital Landsat 8 año 2015..... | 118 |
| 59. | Procesamiento de imagen digital Landsat 8 año 2016..... | 119 |
| 60. | Procesamiento de imagen digital Landsat 8 año 2017..... | 120 |
| 61. | Procesamiento de imagen digital Landsat 8 año 2018..... | 121 |
| 62. | Procesamiento imagen digital caso de estudio, Landsat 7 año 2009 - 2013..... | 123 |
| 63. | Procesamiento imagen digital caso de estudio, Landsat 8 año 2014 - 2018..... | 124 |
| 64. | Porcentaje de cobertura para el caso de estudio..... | 126 |
| 65. | Procesamiento imagen digital caso de estudio, Landsat 7 año 2009..... | 128 |
| 66. | Procesamiento imagen digital caso de estudio, Landsat 7 año 2010..... | 129 |
| 67. | Procesamiento imagen digital caso de estudio, Landsat 7 año 2011..... | 130 |
| 68. | Procesamiento imagen digital caso de estudio, Landsat 7 año 2012..... | 131 |

| | | |
|-----|--|-----|
| 69. | Procesamiento imagen digital caso de estudio, Landsat 7 año 2013 . | 132 |
| 70. | Procesamiento imagen digital caso de estudio, Landsat 8 año 2014 . | 133 |
| 71. | Procesamiento imagen digital caso de estudio, Landsat 8 año 2015 . | 134 |
| 72. | Procesamiento imagen digital caso de estudio, Landsat 8 año 2017 . | 135 |
| 73. | Procesamiento imagen digital caso de estudio, Landsat 8 año 2018 . | 136 |
| 74. | Mapa de pendiente generado con un DEM de 12 m de resolución | 138 |
| 75. | Comparación mapa de pendientes (superior) versus mapa generado por Conred (inferior) | 139 |
| 76. | Mapa de localización El Incienso, ciudad de Guatemala | 142 |
| 77. | Característica geológica cerca a la barranca El Incienso | 144 |
| 78. | Mapa geológico ciudad de Guatemala..... | 145 |
| 79. | Proceso erosivo a orillas del puente El Incienso | 152 |
| 80. | Zona de evaluación barranca El Incienso | 153 |
| 81. | Zona de susceptibilidad y clasificación al deslizamiento | 157 |

TABLAS

| | | |
|-------|---|----|
| I. | Caracterización del origen de las amenazas..... | 3 |
| II. | Niveles de intensidad sísmica..... | 46 |
| III. | Posición fisiográfica, material madre y características de los perfiles de los suelos de la ciudad de Guatemala | 47 |
| IV. | Tipo de perfil de terreno ocupado por los asentamientos en el área metropolitana en el año 2010 | 51 |
| V. | Características y espesores de la ciudad de Guatemala | 61 |
| VI. | Clasificación de píxeles de una imagen digital..... | 70 |
| VII. | Matriz de confusión posclasificación | 74 |
| VIII. | Atributos de la imagen digital de los sensores Landsat..... | 82 |
| IX. | Valor del índice de Kappa..... | 90 |

| | | |
|---------|---|-----|
| X. | Clases de pendiente y valor del parámetro Sp | 93 |
| XI. | Valores de Intensidad de lluvia para la ciudad de Guatemala | 94 |
| XII. | Valores de disparo de lluvia DII | 94 |
| XIII. | Promedio mensual de lluvia | 96 |
| XIV. | Valores ajustados de precipitación al modelo de Mora-Vahrson | 96 |
| XV. | Valores de humedad del terreno | 97 |
| XVI. | Valores de disparo de sismicidad | 98 |
| XVII. | Valores de susceptibilidad litológica, SI | 99 |
| XVIII. | Clasificación de susceptibilidad litológica, SI | 99 |
| XIX. | Calificación susceptibilidad a deslizamientos | 100 |
| XX. | Valores de superficie en metros cuadrados para una evaluación con sensores remotos, empleando un análisis multitemporal | 108 |
| XXI. | Valores de superficie en porcentaje para una evaluación con sensores remotos, empleando un análisis multitemporal | 109 |
| XXII. | Clasificación mediante el empleo de imágenes satelitales a los alrededores del puente El Incienso | 122 |
| XXIII. | Porcentaje de las áreas, alrededor del puente El Incienso | 125 |
| XXIV. | Porcentaje de las áreas, alrededor del puente El Incienso | 127 |
| XXV. | Clasificación de pendientes para la ciudad de Guatemala | 140 |
| XXVI. | Clasificación de pendiente para el área de influencia | 140 |
| XXVII. | Resultados Mora - Vahrson | 141 |
| XXVIII. | Clasificación del sitio para el espectro sísmico | 146 |
| XXIX. | Ensayo de corte directo sobre talud | 147 |
| XXX. | Matriz de confusión | 150 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo | Significado |
|--------------------------|--|
| a | Aceleración, área |
| g | Aceleración de la gravedad = 9,81 m/s ² |
| z | Altura topografía o cota, elevación |
| A | Área |
| ρ | Densidad |
| d,D | Diámetro |
| x | Distancia |
| F | Fuerza, empuje |
| L | Longitud |
| π | Parámetro adimensional |
| p | Presión, perímetro mojado |
| y | Profundidad, distancia |
| r | Radio |

GLOSARIO

| | |
|--------------------------------|---|
| AASHTO | American Association of State Highways and Transit Officials (Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y de Transportes). |
| Agua de escorrentía | Agua proveniente de la precipitación, la cual cae hacia la superficie terrestre, haciendo un recorrido en la parte superior de los suelos, hasta llegar hacia las corrientes de agua. |
| Agua de infiltración | Fracción del agua proveniente de la precipitación, que penetra en el suelo. |
| Agua freática | Es aquella que puede desplazarse hasta llegar a la zona de saturación de un macizo rocoso o fracción de suelo, por efecto gravitacional. |
| Amenaza | Probabilidad que ocurra un evento que cause pérdidas humanas o daños materiales en un sitio. |
| Análisis granulométrico | Análisis de las proporciones relativas para dimensionar las partículas de materiales granulares, las cuales estarán comprendidas en rangos definidos de diámetro, mediante un proceso de separación utilizando tamices de |

distintas aberturas o bien a través de la exploración por medios visuales. (Normas ASTM D422 y D1140).

Ángulo de fricción interna (ϕ) Ángulo comprendido debido a los esfuerzos normales y la tangente, representados por círculos conocidos como la envolvente de Mohr, cuya gráfica en un punto representa la ruptura por distintas cargas aplicadas hasta llegar a su ruptura.

Antropogénica Originado o provocado por la acción directa o indirecta del hombre.

ASTM American Society for Testing and Materials, (Sociedad Norteamericana de Ensayos y Materiales).

Banda espectral Representa una porción del espectro electromagnético.

Cohesión (c) Resistencia al corte de los suelos expresada por c. Siendo la cohesión un distintivo propio de los materiales donde sus partículas se mantienen unidas, por los esfuerzos internos a las que están sometidos.

| | |
|-------------------------------|--|
| DEM | Digital Elevation Model (Modelo de Elevación Digital). |
| Deslave | Daño originado por las precipitaciones o crecientes que erosionan las masas de suelo. Expresión de lenguaje coloquial originaria en México, que hace la descripción de los términos genéricos deslizamiento o erosión en masa. |
| Deslizamiento | Se emplea para describir los procesos de erosión en masa de los materiales removidos, a lo largo de una superficie precedido de una deformación visible. |
| Envi | Software para procesamiento de imágenes satelitales de Harris Geospatial. |
| Erosión | Procesos en que la corteza terrestre son iniciados por una meteorización, posterior son transportados y removidos por agentes naturales o antrópicos. |
| Esorrentía | Flujo del agua que circula sobre la superficie terrestre, con rumbo hacia los cuerpos de agua. |
| Esorrentía superficial | Agua de esorrentía que fluye sobre la superficie del terreno hasta los cuerpos de agua más cercanos. |

Estabilidad

Cuando una masa de material o estructura puede estar sometida a esfuerzos sin exponer una deformación permisible.

Estudio geotécnico

Generación y evaluación de la información sobre las características de un terreno, dirigidas a mejorar las condiciones de una obra y el diseño de sus cimentaciones o bien su análisis de estabilidad en taludes para su conservación.

Geodinámica

Rama que estudia la geología, que evalúa los procesos de la dinámica de la tierra y las fuerzas que intervienen.

Geomorfología

Ciencia que describe las distintas configuraciones de la corteza; principalmente su taxonomía, su descripción y los cambios geológicos registrados en un período de tiempo que se tienen registrados. Este tipo de terminología es aplicado para describir los paisajes, pero hoy en día se ha limitado para describir los rasgos producidos por erosión y sedimentación.

Georeferenciación

Es un proceso de localización geográfica, dentro de un sistema de coordenadas UTM zona 15 para la ciudad de Guatemala. Es decir, ubicar la dirección delimitados en un mapa digital; el cual se asocia a un objeto identificado en coordenadas, este puede expresar algunos datos de vital información como sociodemográficos como el estrato, localidad, entre otros.

IDF

Abreviatura para en hidrología, para definir las curvas de intensidad – duración - frecuencia.

Imagen satelital

Consiste en un conjunto de matrices, una por cada canal del sensor, en la que aparecen dígitos del 0 al 255.

Isodata

Iterative Self-Organizing Data Analysis Techniques, es el algoritmo más adecuado para delimitar los grupos de valores homogéneos dentro de la imagen.

Isotrópico

Término aplicado a los materiales cuyas propiedades son independientes según la dirección que se realice una medición.

| | |
|---------------------------|---|
| Landsat | Es una serie de satélites construidos y puestos en órbita por Estados Unidos, para la observación en alta resolución de la corteza terrestre. |
| Mecánica de rocas | Ciencia que describe el comportamiento y sus propiedades mecánicas de las rocas. |
| Mecánica de suelos | Estudio sistemático relacionado a los problemas de ingeniería, basados en la hidráulica y mecánica sobre el comportamiento de los suelos u otras acumulaciones de partículas. |
| Meteorización | Conjunto de procesos externos que provocan la alteración y disgregación de las rocas en contacto con la atmósfera. |
| Muestra | Fracción de material que se extrae para determinar sus propiedades o bien las características ya sea parcial o en su totalidad. |
| Permeabilidad (k) | Capacidad de un macizo rocoso o de un suelo, a diferentes presiones, permite el paso de fluidos. |
| Roca | Material sólido formado de distintos minerales que se localiza en grandes masas o fracciones en la corteza terrestre. |

| | |
|----------------------|---|
| Satélite | Son elementos artificiales que orbitan alrededor de asteroides o planetas. |
| Sensor | Es el aparato que reúne la tecnología necesaria para captar imágenes a distancia y que es transportado en una plataforma. |
| Sostenible | Descripción de los medios biológicos que mantienen el avance antropogénico, manteniendo los ecosistemas en el transcurso del tiempo; refiriendo a un equilibrio entre el recurso que lo rodean. |
| Teledetección | La teledetección o percepción remota engloba una serie de técnicas, donde el hombre puede analizar la superficie terrestre a través de imágenes obtenidos por sensores remotos. |

INTRODUCCIÓN

Este trabajo expondrá los lineamientos para la obtención y procesamiento de imágenes satelitales, a partir del uso de los sensores remotos Landsat 7 y 8. Permitirá obtener información precisa por medio de los cambios a los cuales se somete la superficie terrestre por el avance de los procesos antrópicos.

Como punto de partida, la evaluación de los parámetros evolutivos o transformantes de una geoforma, se realizaban mediante un reconocimiento de campo. Gracias al aporte de las fotografías es posible analizar, desde el gabinete, las zonas de difícil acceso, sin embargo, no debe obviarse la visita *in situ*. Posteriormente, en la década de los setenta mejoró la recolección de datos mediante el perfeccionamiento de los sensores remotos, obteniendo imágenes de cualquier parte de la superficie terrestre.

A pesar de estos cambios, describir la evolución de una zona de estudio es una labor compleja, salvo que sean muy evidentes los cambios ambientales en la interacción hombre – naturaleza o bien, de origen natural. Aún en estos casos, la cuantificación y valoración de la magnitud del entorno a evaluar, es de mayor importancia para identificar impactos amenazantes. Sin embargo, países que están iniciando un desarrollo en sus tecnologías para la prevención de estos eventos, escasamente se interesan en la aplicación de la teledetección para la reducción de desastres, no proporcionando a los profesionales dedicados a la investigación, esos recursos y capacitaciones para hacerlo realidad.

Guatemala, por su posición geográfica, es vulnerable a distintos fenómenos naturales y de origen antrópico, ya que algunos poblados se encuentran a orillas

de laderas. Por ello, se carece de control sobre la escorrentía para el manejo adecuado de las aguas de precipitación y la consecuente deforestación, que son factores que aumentan el riesgo de inestabilidad de los taludes.

En la actualidad, en el mundo, las imágenes satelitales se aprovechan ampliamente por medio de los sensores remotos que contienen una información con distintivos relacionados con el pasado. Recopilan información de las condiciones atmosféricas y de la superficie terrestre que reflejan riesgos inminentes. Esto es posible mediante valores numéricos de una data geofísica detectada, cuyas imágenes captadas proporcionan una visión multiespectral del territorio.

La limitada adquisición de programas de monitoreo para su implementación puede deberse a que se han establecidos barreras de un carácter institucional o bien por la propia pericia humana en los análisis e interpretación de resultados, para utilizarlos rápidamente, lo que genera falta de interés en los mismos.

La topografía irregular de la barranca El Incienso permitió seleccionar un área de cuatro kilómetros cuadrados para identificar mediante un análisis multitemporal con imágenes satelitales el crecimiento que se ha tenido al noroeste de la ciudad de Guatemala. En este crecimiento, en los últimos años, se construyeron múltiples tipos de solares en áreas cercanas a laderas. Es importante investigar estas áreas ya que se cuenta con una gran cantidad de información gratuita y sistemas de información geográfica para su modelamiento. Estas herramientas son útiles para los profesionales interesados en esta rama de estudio.

Por lo anterior, en el capítulo uno se abordarán las características de la corteza terrestre y la facilidad de obtención de datos empleando los recursos tecnológicos. En el capítulo dos, se justifican los parámetros para el cambio y uso de suelos, empleando imágenes satelitales ligados a los resultados esperados en el capítulo tres donde se expone la metodología para recolección de datos, además se resume la transformación de una imagen satelital con el manejo de bandas del espectro electromagnético, se realiza un análisis multitemporal para identificar la evolución del crecimiento urbano. En el capítulo cuatro, se describen e interpretan los resultados, de una imagen digital. Se evalúa con los lineamientos de (Mora & Varson, 1994) y los ensayos de laboratorio obtenidos *in situ* a partir de ensayos de corte directo, para con ello obtener cartografía digital de susceptibilidad a deslizamientos.

ANTECEDENTES

En los últimos años se ha evidenciado que en el país han ocurrido deslizamientos de origen antrópico. Expertos en gestión de riesgos indican que no se está suficientemente preparado para dar una pronta respuesta ante la afectación de estos eventos. La presencia de estos sucesos sin que el ser humano interfiera en los cambios de la superficie terrestre estaría limitada a los fenómenos naturales como una parte integral de los ciclos meteorológicos y geológicos.

El primer estudio relacionado ante los riesgos naturales fue desarrollado por la Dirección General de Investigación (DIGI) de la Universidad de San Carlos de Guatemala, denominado *Análisis de vulnerabilidad física para la prevención de desastres en la ciudad de Guatemala* (Gándara, 1993). En él se reseñan los riesgos asociados al territorio nacional. Evidencia que un 27 % de los deslizamientos en asentamientos son originados por estructuras inseguras.

Otro estudio que identifica las fallas geológicas y tectónicas que afectan el valle de Guatemala es *Evaluación de la amenaza sísmica para la ciudad de Guatemala* (Tobías, 1993). Este texto complementa la información geográfica porque define zonas vulnerables con una ocurrencia alta ante un sismo por medio de mapas temáticos. La realización de estos mapas, como herramientas para detectar zonas ante riesgos son difíciles de estructurar; ya que debe justificarse que la consideración de las variables elegidas son las adecuadas para destacar la realidad existente. Generalmente, se vinculan al cambio del ser humano con la interacción en el medio ambiente y se relacionan con inestabilidad en el relieve (Olivares, 2004).

Un ensayo referido al *Manejo ambiental y prevención de desastres, dos temas asociados* (Cardona, 1996) alude a la tipología de los desastres, los riesgos y el crecimiento de la población que emigra a zonas urbanas. Enfatiza en la hostilidad manifiesta por el ser humano contra la naturaleza y cree que ha sido víctima de acontecimientos de un ser divino o del propio infortunio de su destino, sin distinguir la relación del origen causal y el escenario receptor de los efectos; clasificándose como respuesta a un proceso evolutivo, interferencias e interacciones recíprocas (Ferrando, 2003) por ejemplo, las fracciones de precipitaciones que producen impactos de salpicaduras modificando las características del relieve hasta erosionarlo, si no se tiene medidas de mitigación para su control. En este caso son evidentes los mecanismos controladores que involucran las distintas disciplinas con acciones de evaluación y prevención.

Uno de los factores más importantes para el desarrollo de proyectos de ingeniería sostenible, para determinar los componentes críticos o susceptibles a un daño, además de considerar medidas de mitigación, son los trabajos de graduación generados por profesionales de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Se constituyen en el punto de partida la prevención y vulnerabilidad; se plantean los conceptos, análisis, puntos de vista y la orientación que desean aclarar los casos de estudio en el *Manual de elaboración de mapas de vulnerabilidad a deslizamientos y sequías utilizando como herramienta sistemas de información geográfica* (De León, 2013).

Así mismo, en la tesis *Análisis de vulnerabilidad global y amenaza a deslizamientos, diagnóstico y servicio realizado en el municipio de Santa Catarina Pínula, Guatemala* (Mazariegos V. , 2012), propone una solución sustentable remediando los efectos negativos que se han desarrollado sobre cierto umbral social-económico, que afectan al medio ambiente. En la actualidad, con ayuda

de la informática; la evaluación y prevención de áreas ante un deslizamiento, se ha convertido en una herramienta para la geotecnia, complementándose con el uso de sensores remotos, imágenes por satélite, como también las obtenidas por drones. Para que se deriven datos útiles se han propiciado mecanismos que permiten obtener imágenes aeroespaciales con resoluciones más precisas; desde un kilómetro hasta sesenta centímetros, siendo una característica notable en los sensores de última generación (Cordero, 2000).

Las últimas investigaciones con sensores remotos, han contribuido a la detección de deslizamientos; derivado de los modelos de elevación digital puede indicarse con precisión la detección de estos, aportando en la actualidad el avance tecnológico para el procesamiento de imágenes e interpretación, para entidades a respuestas de emergencia, investigadores y público en general a la prevención de desastres, optimizando costos para su monitoreo (LATAM Satelital, 2016).

La teledetección contribuye a generación de cartografía para evaluaciones de susceptibilidad en laderas, permitiendo la distinción de las múltiples imágenes que hayan sido recopiladas, siendo una de sus variables principales la clasificación de los suelos, en que cada cuerpo elegido, posee su propia reflectividad, categorizándose mediante algoritmos clasificados (Swain Y Davis, 1978).

La cobertura vegetal es un factor que toma mucha relevancia ante la susceptibilidad a un deslizamiento, en la que una gran mayoría de investigadores destacan la importancia del cambio y uso de suelos, concordando que la vegetación define en la mayoría de los casos, la estabilidad en laderas, teniendo un efecto positivo en los cambios abruptos de pendiente, en donde el efecto de la cohesión de los suelos, las raíces aumentan el esfuerzo cortante, siendo una

medida de mitigación natural contra la erosión para la protección de la escorrentía superficial (Estrada, 2017).

Estos procesos naturales, que muchas veces no se demoran en cambios importantes, considerándose como positivo o bien negativo, desencadena un efecto rebote; traduciéndose como todo lo que el hombre le haga a la naturaleza este se volverá hacia él; en cadena de consecuencias insospechadas, pero haciéndose la prevención con modelos de información geográfica, desacelerando esos impactos que se presentan en deslizamientos, (Maskrey y Lavell, 1993).

La evaluación del crecimiento urbano en la barranca El Incienso, situada al noroeste de la ciudad de Guatemala y ante el continuo cambio poblacional es necesario que se actualice la información en tiempo real, preciso y eficiente del ámbito espacial, son indispensables los proyectos de ingeniería ligados al sector industrial o medioambiental. Las investigaciones realizadas por profesionales orientarán las metodologías y procesos para los modelamientos de la información recopilada de los sensores remotos que se traduce a imágenes satelitales, precipitación, indagando zonas vulnerables o de riesgo; haciendo su comparación con la información concebida por entidades públicas de nuestro país para su validación.

Se deben utilizar modelos de cómputo especializados para la clasificación de una imagen satelital para determinar la cobertura y los cambios de uso de suelos, a partir de un análisis multitemporal ocurridos en una zona de interés, aprobando una correcta identificación e interpretación de las variaciones sustanciales ocurridas en un periodo de diez años con la correlación de un reconocimiento de campo de la zona por evaluar.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Un deslizamiento afecta, generalmente, la corona del talud y sucede como consecuencia del manejo inadecuado de la escorrentía superficial, la expansión urbana y el cambio en la superficie terrestre, con construcciones de infraestructuras en laderas con materiales no apropiados.

Las orillas de los barrancos ubicados al noroeste de la ciudad de Guatemala, como la barranca El Incienso, son más vulnerables a deslizamientos debido al cambio de uso del suelo como consecuencia de la expansión de la metrópoli. Sin embargo, se carece de mecanismos de monitoreo para prevenir desastres que cuenten con información actualizada, cuyo punto de partida sean las generadas por imágenes satelitales que servirán para tipificar las áreas susceptibles. Con ellas se elaboran matrices de los factores detonantes de lluvia y condiciones litológicas, ante este tipo de eventos.

La aplicación de las imágenes Landsat que se complementan con metodologías desarrolladas para los cambios y uso de suelos. Parten de un análisis multitemporal no menor a diez años en el cual se base el profesional que desee evaluar las variaciones de la superficie terrestre para plantear puntos de control con el respaldo de información renovada, sin que se necesite de instituciones para elaborar este tipo cartografía digital.

Uno de los métodos sugeridos por su sencillez de interpretación para generar mapas de susceptibilidad de una determinada región a deslizamientos en laderas, es Mora – Vahrson que, al combinarse con el uso de las imágenes satelitales, no permite en si la probabilidad de deslizamientos, pero en cambio,

permite describir sus tipologías, formas, distinguir zonas vulnerables y la probabilidad que ocurra, mediante un monitoreo de las representaciones con más relevancia, como las lluvias y las consecuencias del crecimiento urbano a orillas de barrancos, que se ven frecuentemente relacionados por la interacción del hombre con el medio ambiente.

Es importante señalar que la ciudad de Guatemala, por su clima, topografía y el cambio y uso de suelo por la creciente demografía, hace que sea potencialmente vulnerable ante deslizamientos en laderas.

Por lo anterior, se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo se define la clasificación de las firmas espectrales de una imagen satelital, para determinar el cambio y uso de suelos, en la barranca El Incienso?

Además, se plantean las siguientes interrogantes secundarias:

¿Puede analizarse la expansión urbana en laderas, utilizando un análisis multitemporal de diez años?;

¿Cuáles son las variables para la clasificación de la metodología de Mora – Vahrson, de la susceptibilidad a deslizamientos en laderas?

¿Qué elementos son importantes en los resultados obtenidos en ensayos de laboratorio de suelos, de las zonas de interés, ante la susceptibilidad a deslizamientos?

Derivado de la cantidad de información disponible y satélites que giran alrededor de la tierra, vinculado a la constante mejora para el procesamiento

digital de imágenes, esta investigación ayudará al geotecnista a identificar una valoración correcta de la información. Para el caso de estudio se evaluará en los meses que coincidan parcialmente con una parte de la estacionalidad de invierno, exponiendo su modelación, al igual el reajuste que se deberán aplicarle a la cartografía, a través de sistemas de información geográfica; orientada a identificar los rasgos más característicos en la topografía, humedad, precipitación, expansión de estructuras para viviendas y distribución geográfica, que combinarán una visión tridimensional de las zonas que puedan estar vulnerables a un deslizamiento.

JUSTIFICACIÓN

El geoprocesamiento de una imagen obtenida a partir de sensores remotos es propicio para realizar un inventario de áreas susceptibles a deslizamientos, mediante una cartografía digital. Los lineamientos por considerar son los factores geomorfométricos, geodinámicas y características físicas del área en estudio. A partir de ello, se conciben modelos para identificar infraestructuras para una proyección demográfica planificada en áreas con topografía irregular o pendientes pronunciadas, ante impactos negativos de desprendimientos de masa de suelos, que pueden corresponder a origen antrópico o bien, por fenómenos naturales.

Estas incógnitas, que suceden en los movimientos en masa, son los sucesos geológicos que tienen mayor frecuencia en los países de Latinoamérica, sobre todo en las urbes, la infraestructura y el medio ambiente, donde muchas veces son catastróficos y sus efectos se magnifican cuando se presentan sismos o bien precipitaciones extremas. En las últimas décadas, se ha evidenciado que estos movimientos en masa son detonados por la variación climática, cuya afectación es crítica en zonas con población.

Para la evaluación de proyectos mediante la implementación de estos modelos digitales, los análisis de tipo multitemporal, obtenidas a través de la teledetección, su actualización constante de los procesos de cambio y uso de suelos son fundamentales como una herramienta para la localización de zonas que se encuentren en expansión, siendo para el caso de estudio la barranca El Incienso.

Los avances tecnológicos exigen procesos planificados cuya finalidad sea un desarrollo sostenible y un avance equilibrado. Este tipo de instrumentos presentan variables complejas que exigen sistemas de información geográfica. Con ello, se garantiza que los registros y representación de los resultados de zonas susceptibles se conviertan en una metodología para generar modelos de elevación digital a través de mapas temáticos. Estos deben complementarse con la geotécnica para interpretarse correctamente y comprender fenómenos potencialmente destructivos cuyos efectos deben entenderse detalladamente aplicando las mejoras radiométricas como también espaciales incorporados en los sensores remotos.

Por eso, para una proyección de cambio y uso de suelos en las ciudades, las imágenes digitales son útiles para tomar decisiones. Coadyuvan en la definición de las zonas cuyas áreas superficiales vulnerables con una probabilidad que ocurra un deslizamiento deben monitorearse para su control, como consecuencia del crecimiento urbano y las variables donde se involucre al ser humano con el medio ambiente.

El avance de la informática, como las técnicas para su generación y el empleo de sensores remotos para la transformación de imágenes satelitales, contribuirá a la reducción de los impactos por deslizamientos en laderas y podrá emplearse como una estrategia ante la ocurrencia en la zona de estudio y otras con similares condiciones físicas haciendo su interpretación con una cartografía descriptiva, aplicando (Mora y Varson, 1994).

Una de las variables para identificar estas condiciones de inestabilidad en laderas son los valores de susceptibilidad a los cambios de uso de suelos, describen los lineamientos para definir los algoritmos matemáticos que han

aportado los especialistas en sistemas de información geográfica, estos relacionan esas variables asociadas ante la ocurrencia a un deslizamiento.

Antes de evaluar y validar los problemas asociados a una región en cambios de relieve, debe buscarse, en internet, los registros creados para ello. Se debe tener una línea base en la investigación, por ejemplo, mapas de topografía, precipitación, suelos, geología, entre otros; pero muchas veces estarán a gran escala, poseyendo una gran inexactitud versus los datos recopilados; sirviendo esta información únicamente como referencia para un análisis preliminar de los impactos posibles.

Este trabajo de investigación contribuye con los conocimientos técnicos del procesamiento para cartografía digital. Está dirigido a los profesionales de ingeniería con especialización en geotécnica para plantear nuevas soluciones técnicas para prevención de desastres en nuestro país y elaboración de estudios de factibilidad. En él se evalúan los conceptos más relevantes, mediante el uso de la teledetección por medio de sensores remotos, para los sitios donde su relieve se dificulte para una exploración detallada de campo.

Asimismo, los resultados contribuyen a la comprensión del cambio y uso de suelos, añadiendo valor a las variables que se ven implicadas en las amenazas por deslizamientos en laderas. Estos elementos son importantes por su facilidad en la recolección de datos y su actualización constante en el análisis de tiempo para la formulación de estrategias, hasta conseguir la mitigación de los mecanismos del riesgo.

La investigación abarca los deslizamientos de tierra, el cambio y uso de suelos mediante la aplicación de la metodología de Mora – Vahrson, asociados a información histórica con ayuda de la teledetección a través de un análisis

multitemporal, proporcionando a los planificadores el grado de vulnerabilidad para un área determinada, las medidas específicas a implementar para proyectos de inversión y la ubicación de instalaciones en zonas de riesgos. Estos aportes proveerán una herramienta de sencilla implementación para la evaluación de zonas de vulnerables en el campo de la geotecnia.

OBJETIVOS

General

Analizar los cambios y usos de suelos, empleando imágenes satelitales, a fin de identificar zonas vulnerables a deslizamientos, debidos a la expansión del crecimiento urbano a orillas de laderas, ubicados al noroeste de la ciudad de Guatemala.

Específicos

- Interpretar el uso de bandas espectrales para generar cartografía de cambio y uso de suelos para un período de diez años.
- Determinar las zonas vulnerables, a partir de los factores esenciales que pueden intervenir en la estabilidad de taludes, haciendo su interpretación geotécnica con Mora-Vahrson.
- Describir el tipo de material geológico, por medio de ensayos de laboratorio e identificar sus propiedades geomecánicas.

ALCANCES

La tipología de este trabajo de investigación es correlacional-descriptivo con la información regional disponible realizada por el Instituto Geográfico Nacional y el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, por ejemplo, planos cartográficos con curvas de nivel, precipitación de lluvias, geología, hidrología y otros elementos que al combinarse a sistemas de información geográfica, estableciendo la precisión de imágenes satelitales para una superficie de cuatro kilómetros cuadrados, en los cuales puede recopilarse una data actualizada con ayuda de sensores remotos. Así mismo, si los factores climáticos, pueden ser elementos que influyan en la calidad e interpretación del modelo digital.

Uno de los fundamentos del diseño de la investigación es el cambio y uso de suelos para un periodo de diez años; la sistematización de las imágenes se obtendrá de los sensores remotos denominados Landsat 7 y 8, que incorpora dos instrumentos de barrido: *Operational Land Imager (OLI)* y un sensor térmico infrarrojo llamado *Thermal Infrared Sensor (TIRS)*. Estos se descargan de modo gratuito del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Para su modelamiento puede variar según la escala que se esté aplicando y la combinación de las bandas del espectro electromagnético. Con ello, se identificarán los elementos naturales y antrópicos, que contribuyen a los cambios ambientales; por ejemplo: vías de comunicación, uso de la tierra y áreas pobladas.

Su procesamiento e interpretación se modelará a través de sistemas de información geográfica, para la generación de un mapa temático con la metodología de (Mora y Varson, 1994), es difícil hacer un control de fenómenos

geofísicos con sensores remotos, haciendo su clasificación en zonas o regiones con atributos similares.

En el reconocimiento de campo se extraerán muestras de suelo para evaluarlas en laboratorio donde se cuidará su clasificación e interpretación de resultados. Se compararán con la metodología de M (Mora y Varson, 1994), para que se ajuste a la cartografía digital generada de susceptibilidad de riesgos ante deslizamientos en la barranca El Incienso.

Para interpretarlos se aplicará el mapa temático de riesgos, generados por Conred el cual se comparará con el mapa de pendientes, cuyos resultados obtenidos se visualizará a una escala 1: 13,000 partiendo de una clasificación del cambio de uso de suelos.

La clasificación de la información y sus dimensiones simbólicas es esencial. Su recopilación *in situ* permiten al geotecnista emitir dictamen técnico sobre los proyectos cuya inversión corra riesgo porque requieran infraestructuras que deban instalarse en topografía con alta pendientes que puedan afectarlas. Podrá generar mapas temáticos ante la susceptibilidad a deslizamientos los cuales coadyuvarán en el desarrollo y se podrán replicar en cualquier punto geográfico del país. Con ello, el profesional podrá aplicar estos sistemas en proyectos que requieran un análisis y una evaluación de zonas con vulnerabilidad a un deslizamiento.

HIPÓTESIS

El uso de imágenes satelitales para actualizar el cambio y uso del suelo permite implementar la metodología para determinar zonas vulnerables a deslizamientos en la barranca El Incienso.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

La investigación se limitará a identificar las zonas vulnerables a deslizamientos causados por la expansión urbana en ladera de la barranca El Incienso y cambio del uso de suelos para un período de diez años. Se evaluarán, mediante ensayos de laboratorio, los parámetros más representativos de la corteza terrestre. La clasificación se basará en la AASHTO M-145 para establecer sus características geomecánicas. Finalmente se comparará con las imágenes de satélite obtenidas por medio de la teledetección y se planteará un análisis multitemporal, usando como herramienta, los sensores remotos Landsat.

Para el estudio se seleccionó una extensión de cuatro kilómetros cuadrados al noroeste de la ciudad de Guatemala, donde existe una fuerte incidencia de construcciones desarrolladas en los últimos años, en zonas con topografía irregular y vulnerables a la afectación de un evento de deslizamiento.

De acuerdo con las investigaciones relacionadas con este tema, se plantean varios métodos que contribuirán al conocimiento y uso de modelos de elevación digital para establecer sus geoformas de mayor interés y obtener mediciones con alta precisión.

Abarcará los siguientes aspectos: 1) formulación del problema, 2) fase exploratoria, 3) recolección de datos para la construcción de un modelo digital, por medio del sensor *Alos Palsar* 4) trabajo de campo, 5) trabajo de gabinete, 6) presentación de resultados y 7) interpretación de resultados a través de mapas digitales.

En las primeras fases se tomará en consideración el pretratamiento que debe realizarse a las imágenes satelitales, que es uno de los objetivos principales de la investigación; seguidamente la recopilación de información en la zona a evaluar, a partir de:

- Mapas geológicos que se han generado por el Instituto Geográfico Nacional.
- Imágenes a través de los satélites Landsat 7 y 8.
- Análisis multitemporal por imágenes satelitales.
- Representar las zonas geomorfológicas a través de mapas temáticos.
- Generación mapas de pendientes.
- Análisis de la granulometría y clasificación del suelo.

La investigación será un avance tecnológico-práctico. Se utilizarán imágenes satelitales y se complementarán con los sistemas de información geográfica, especialmente para futuros maestros en ingeniería geotécnica de la Universidad de San Carlos. La finalidad es identificar los problemas relacionados con deslizamientos en laderas, integrado con la construcción de algoritmos, considerando la banda del pancromático que expondrá la barranca El Incienso a una resolución espacial de quince metros.

Valorando el estudio a una metodología para la detección, que se categoricen áreas ante una susceptibilidad a ser afectadas por movimientos en masa, clasificándose las variaciones temporales y espaciales sobre la superficie terrestre sus resultados sean satisfactorios, ofreciendo ventajas en términos de resolución espectral, su obtención gratuita y resolución temporal.

1. CONCEPTOS Y PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DIGITALES OBTENIDOS A TRAVÉS DE SENSORES REMOTOS

Mediante el uso de la información digital cartográfica disponible y la descarga de imágenes gratuitas, en plataformas diseñadas para evaluación de análisis de riesgos; se realiza la construcción de esos escenarios y su representación espacial según la posición geográfica de la zona que se desea evaluar. Es importante generar mapas con una baja complejidad, permitiendo a los usuarios identificar las amenazas en caso de emergencia de perfil preliminar, precisando con ello situaciones de vulnerabilidad (Renda, 2017).

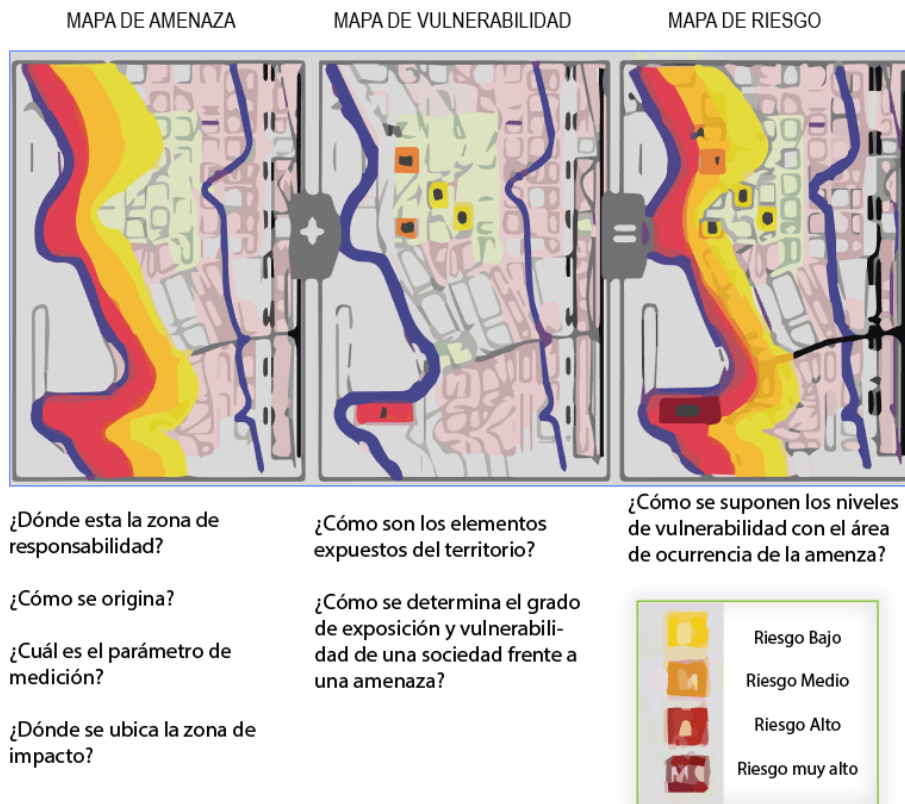
Los análisis de riesgos son referidos a una aproximación de los daños que puedan ocurrir en un evento, ocasionando desastres en distintos escenarios, explicando estos fenómenos con la probabilidad de ocurrencia de origen antropogénico y/o natural, delimitando el análisis de riesgo como la obtención de los conocimientos necesarios para tomar muestras puntuales para definir y caracterizar la amenaza como al igual, la interacción en un punto geográfico.

La identificación de un análisis de amenaza, vislumbra una serie de medidas y acciones destinadas a mitigar los efectos negativos de las operaciones con un alto potencial ante un evento destructor, percibiendo una serie mínima de elementos negativos en la zona a evaluar: origen, zona afectada, causas y consecuencias que resulten del problema (Desarrollo, Programa Delnet de Apoyo al Desarrollo Local, 2010-2011).

1.1. Selección de los parámetros de control

La selección y corrección de imágenes satelitales para iniciar los trabajos de evaluación en las áreas de estudio debe ser cuidadosa. De esta forma, la información se procesa correctamente hasta tener mapas temáticos que respondan a las interrogantes más significativas que se esperan obtener a través de modelos digitales. Los resultados obtenidos de una imagen a través de sensores remotos deben contar con los siguientes elementos: resolución espacial, resolución espectral, resolución temporal y resolución radiométrica.

Figura 1. **Etapas para la elaboración de un mapa de riesgos**



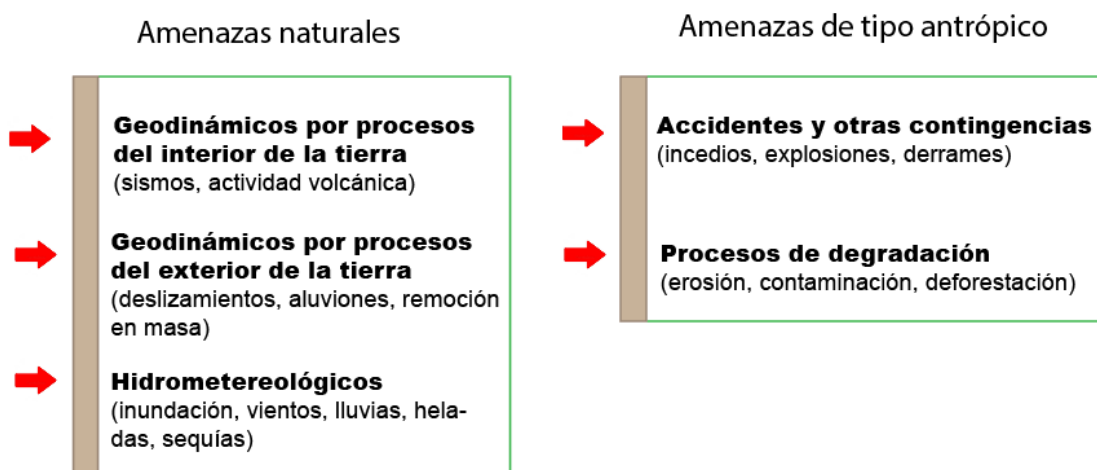
Fuente: Renda (2017). *Mapas de riesgos*.

1.1.1. Identificación de la amenaza

Las unidades de análisis deben definirse como objeto por evaluar que involucre un distrito, comuna o varios municipios, en los que se identifiquen una problemática común. Para representar en una escala gráfica el área estudiada, la elección puede variar en un rango de 1: 5,000 a 1: 50,000 (Renda, 2017). Se deben reconocer los elementos representativos para que su efecto sea un detonante previo a una amenaza, como su vinculación con aquellas que a simple inspección son difíciles a detectar.

En el caso de las amenazas naturales, pueden amplificar su poder de destrucción, cuando se combinan con variables de tipo antrópico, por ejemplo, áreas donde se realizan construcciones a orillas de barrancos, sin la debida supervisión y diseño de profesional, que, al ser activada por lluvias, sismos u otros factores de origen natural, dan con resultado pérdidas estructurales, siendo en los casos más críticos, pérdidas humanas.

Tabla I. **Caracterización del origen de las amenazas**



Fuente: Renda (2017). *Mapas de riesgos*.

Es fundamental detallar los escenarios del medio físico-natural aclarar los criterios de las amenazas identificadas. Para ello, se definirá la topografía, morfología, mecánica de rocas, geología estructural, entre otras condiciones, que aprueben el comportamiento de las franjas críticas que se estén analizando.

1.1.2. Determinación de la vulnerabilidad

Además de identificar los elementos expuestos se deben conocer las tipologías del cambio y uso de los suelos y la tasa de crecimiento socioeconómica para determinar el grado de exposición y la vulnerabilidad de la zona observada. Conred ha elaborado mapas para la ciudad de Guatemala. Esta es una herramienta útil para estimar la ocurrencia ante un evento natural y analizar la cartografía digital. Para ello, deben diferenciarse las zonas urbanas de las rurales.

1.1.3. Características para los escenarios de riesgos

El grado de escala que se desea evaluar, permitirá pronosticar los posibles escenarios de riesgos. Para eso, se delimitará el grado de detalle de la información que se desee representar. De esta forma, las amenazas estarán en función de la evolución y el grado en que afectarán a una población. Además, se considerarán las infraestructuras para las anotaciones técnicas de los impactos, vinculados a la escala y la afectación.

Una vez parametrizada cada amenaza seleccionada, se interpretan los siguientes elementos:

- Prospección de los daños que pueden ocurrir durante un evento, para los elementos expuestos.

- Clasificar por niveles los escenarios de riesgos.
- Identificar las zonas que estén propensas a un daño a deslizamiento de suelos en laderas, a nivel de viviendas, infraestructuras y servicios.

1.1.4. Puntos de recolección de muestras

El manejo de imágenes satelitales requiere de la categorización para la recolección de las muestras y para la generación de mapas temáticos. En este procesamiento la firma espectral expondrá la información de cada píxel, usando una valoración numérica para su clasificación. Muchos objetos tienen distintas combinaciones de ND (números digitales) porque se basa en su reflectancia espectral inherente y en sus propiedades de emisión (Ingeoexpert, 2018).

Dados los avances tecnológicos de los últimos es posible aplicar sistemas de campo para capturar los datos en medios magnéticos. Luego se trasladan al computador, donde algunos sistemas permiten esa actualización colectada o bien la modificación de la información *in situ*.

1.1.5. Procesamiento para las imágenes digitales

Uno de los mayores inconvenientes para los usuarios que trabajan cartografía digital es la aplicación y la utilización de la información disponible, cuando esta es complementada con sistemas de información geográfica, los errores en la proyección y montado de capas, no están habituados, lo que generalmente, por ejemplo, se familiarizan con líneas o polígonos. Usar números o códigos para identificar la posición de una zona por evaluar dificultan la interpretación, por tal razón, se debe utilizar la simbología estandarizada por organismos, como el Instituto Panamericano de Geografía e Historia de Perú (IPGH).

El procesamiento de una imagen obtenida por medio de sensores remotos consiste en la manipulación numérica, incluye el preprocesamiento, realce y clasificación.

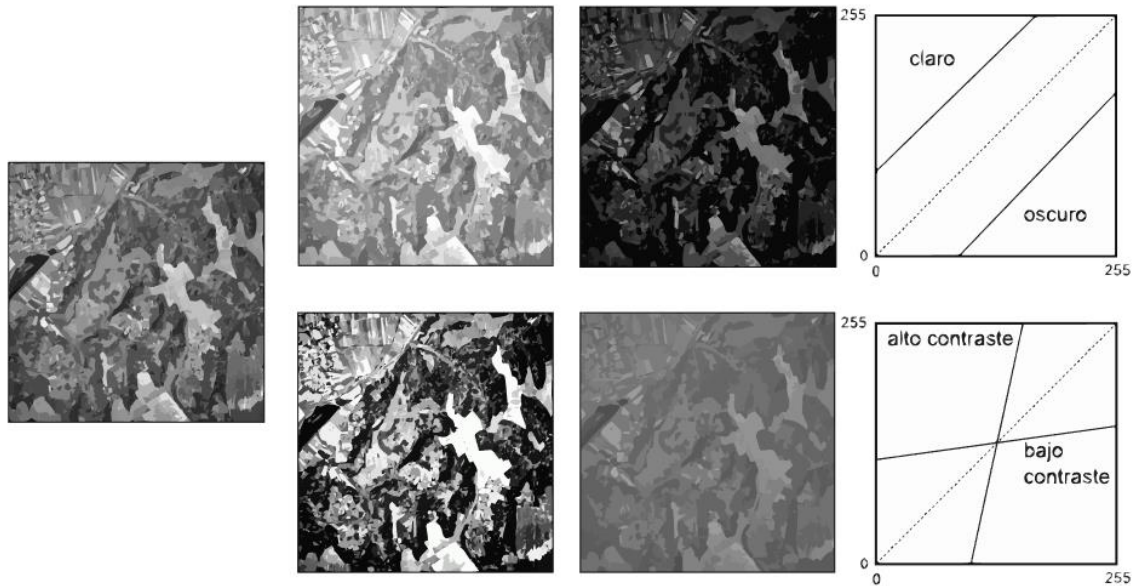
1.1.6. Preprocesamiento

Consiste en la manipulación y corrección de las anomalías radiométricas y geométricas de las imágenes para eliminar el ruido. Estos valores alteran los brillos de los píxeles, fundamentales para los trabajos de clasificación a los cuales afectan los cambios atmosféricos y a esos efectos asociados a la instrumentación del satélite. Estos modelos para la obtención de imágenes digitales y para la precisión de su aplicabilidad necesitan de una data meteorológica detallada relativa a las condiciones que se quiere registrar. Su modelación es compleja, en la actualidad, para corregir los efectos espaciales, se debe tener claro los lineamientos de la aplicabilidad de histogramas para las imágenes espectrales.

1.1.7. Realce

Es una metodología que permite aumentar la interpretación de resultados, es decir, mejora la visualización de una imagen digital. Debe considerarse que no se está añadiendo información contenida en una visualización, sino que parametriza el rango de opciones según el criterio de un especialista en evaluación de riesgos. Una imagen desde el punto de vista virtual tiene como resultados valores ilimitados de resolución. En la actualidad, para calcular la información obtenida a partir de los sensores remotos se clasifica en dos grupos: las operaciones de punto, en que se manipulan los brillos de los píxeles y las operaciones locales, que se definen o bien se asignan valores a cada píxel, tomando como referencia las tipologías de los valores de reflectancia de los objetos.

Figura 2. **Mejora de brillo de una imagen digital**

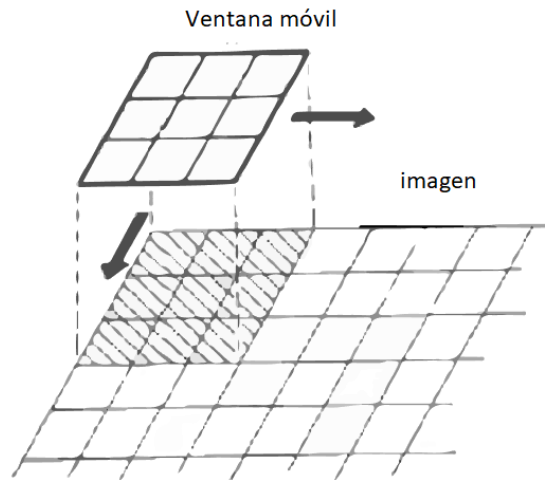


Fuente: Olaya (2019). *Procesamiento de imágenes digitales*.

1.1.8. Filtrado espacial

Teniendo como referencia que un realce no tiene una modificación de los valores en los píxeles, en el filtrado espacial, la información de la imagen digital es rectificadora; en donde cada resultado propio del píxel según su ubicación en una superficie derivada de los sensores remotos se cambia según los valores de los píxeles contiguos. Cuando se describe los conceptos de una percepción remota, la data digital se parametriza y se denomina frecuencia espacial. Se define como el número de cambios o valores que se le asigna a un píxel por unidad de distancia en una región particular de la imagen (Bense, 2007).

Figura 3. **Operación para asignación de valores de un píxel**



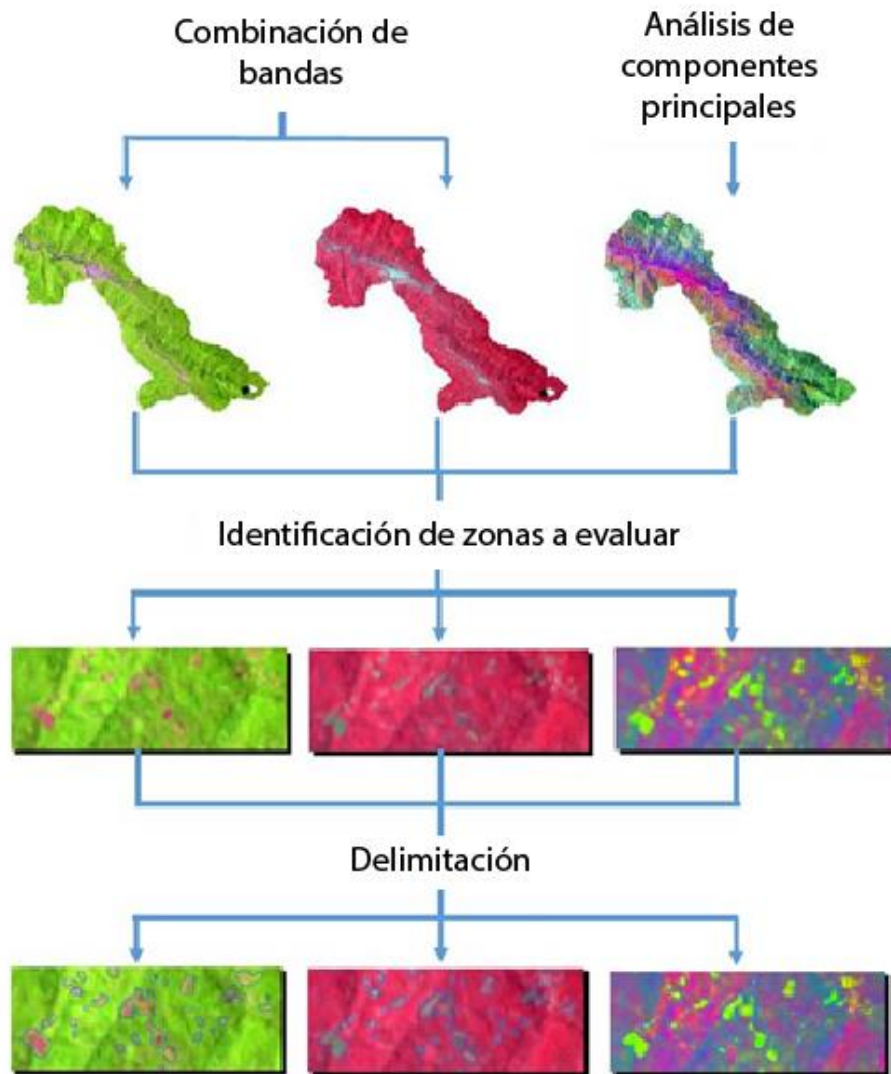
Fuente: Bense (2007). *Teledetección*.

1.1.9. Análisis de las firmas espectrales

Cuando se elige la metodología para clasificar una imagen digital, con frecuencia se comete error en la correlación que se ejecuta en el análisis de las imágenes espectrales porque se incluye información redundante y el resultado es una data pesada, cuyo procesamiento es complejo cuando se efectúan los cálculos matemáticos con los sistemas de información geográfica.

Para reducir la redundancia se aplican algoritmos cuya información se comprima en un conjunto original de N bandas espectrales a un conjunto menor de nuevas componentes (Guerrero, 2011).

Figura 4. Diagrama de flujo para el análisis de componentes principales



Fuente: Condori Luna, Loza Murguía, Mamanti Pati, y Solís Valdivia, (2016). *Análisis multitemporal de la cobertura boscosa empleando la metodología de teledetección espacial y SIG en la subcuenca del río Coroico - provincia Caranavi en los años 1989 – 2014.*

1.1.10. Clasificación para un análisis multitemporal, para un período de diez años

En investigaciones dinámicas o de análisis multitemporal, se define como una dimensión evaluada por medio de tasas de cambio que progresan los cambios ocurridos en más de dos momentos del tiempo (Roy y Tomar, 2001).

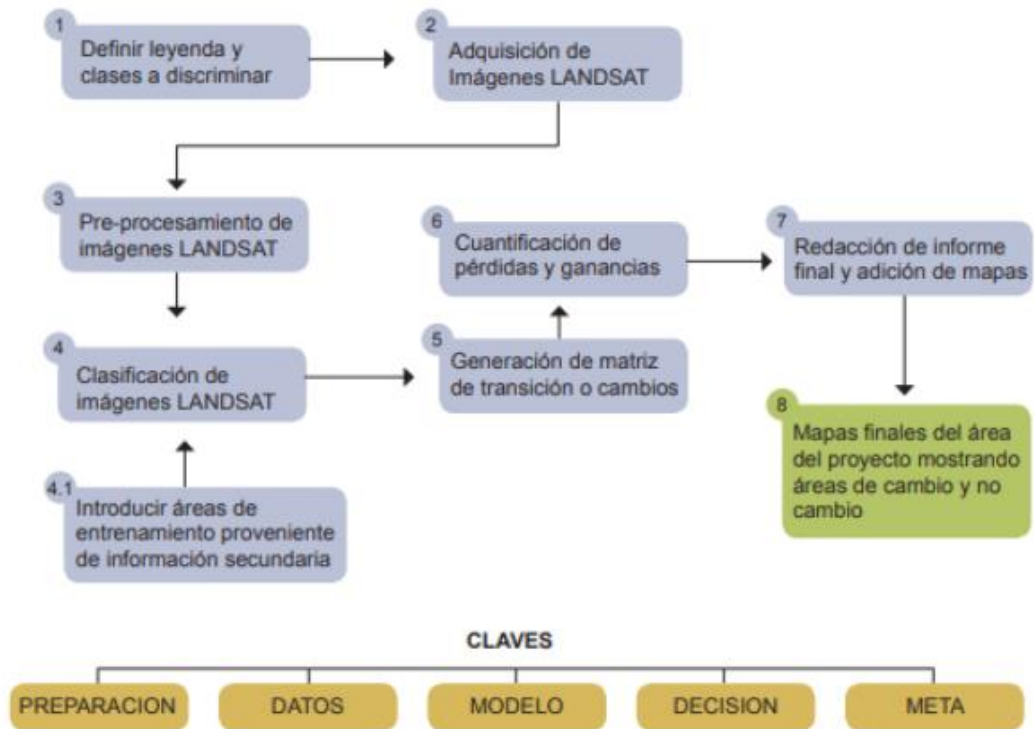
Para evaluar zonas susceptibles de riesgo, requieren de un análisis estático en las imágenes obtenidas, categorizando la información por sus entidades y atributos presentes en un espacio, sin olvidar que se parametrizará en dos fechas específicas. Los patrones de cambios registrados estarán en función del intervalo de tiempo que se esté analizando, pero estas evaluaciones no reflejan la dinámica que puede ocurrir dentro del área de estudio (Avilés, Milla Areneda, y Duarte, 2014).

En la actualidad, se han desarrollado métodos de clasificación para las imágenes digitales que discriminan según su firma espectral (Lambin, 1997), siendo su clasificación:

- Estabilidad ecológica,
- Pérdidas o aumento de la cobertura vegetal
- Cambios ecológicos cíclicos.

Para la estimación de estos cambios naturales y/o antrópicos, generalmente, los resultados generados por un sistema SIG, se fundamenta en la distribución y organización de las unidades transformadas, estableciendo las estructuras o patrones espaciales (Aldana y Bosque, 2008).

Figura 5. Diagrama de flujo para un análisis multitemporal



Fuente: Avilés, Milla Areneda, y Duarte (2014). *Análisis multitemporal período 2000 -2010 para el humedal nacional Térraba-Sierpe y su área de influencia.*

1.1.11. Identificación de clases

La clasificación de los objetos según su firma espectral, el proceso para delimitar los píxeles, en un número finito de clases o categorías individuales, para los softwares especializados para procesar imágenes digitales, tipifican el brillo que identifica los patrones de la información, mediante métodos supervisado o no supervisado (Hord, 1982).

1.1.12. Clasificación supervisada

Para clasificar los ráster por medio de cada píxel de una celda en una imagen digital, en los sistemas de información geográfica se necesita un reconocimiento de campo del área de estudio. Para ello el especialista en evaluaciones de zonas de riesgos marca los puntos más sobresalientes y les asigna un valor numérico para cada clase identificada. Con ello se disminuirá el margen de error en la correlación cuando se genere la nueva firma espectral con el manejo de las bandas de los sensores remotos.

1.1.13. Clasificación no supervisada

Los softwares especializados para una clasificación no supervisada en una imagen satelital, en los algoritmos para el análisis, no incluyen ninguna prioridad para obtener las clases; es decir, los lineamientos para su evaluación se basan en probabilidades. De la misma manera, se genera un archivo con la firma espectral respectiva asumiendo que es homogéneo cada valor de píxel.

1.1.14. Obtención de las muestras

En una imagen digital, la clasificación de la información obtenida a partir de los sensores remotos se definirá con los siguientes elementos:

- Identificar qué información será útil para su clasificación
- Definir la firma espectral del grupo de objetos que serán evaluados
- Asociar y diferenciar los objetos a evaluar
- Clasificación de la cartografía digital
- Guardar y correlacionar los resultados obtenidos

1.1.15. Algoritmo para la clasificación

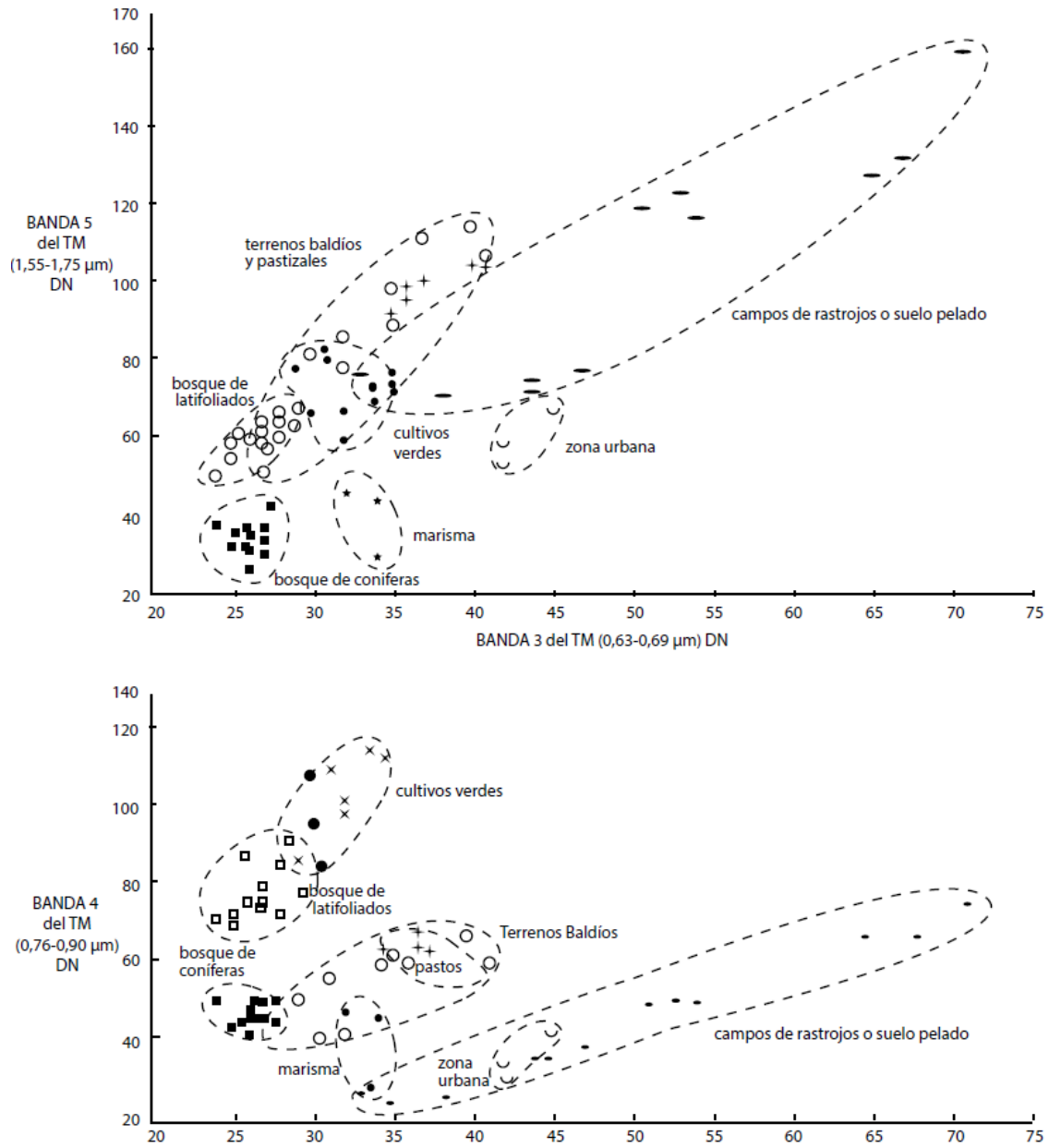
De acuerdo con los algoritmos principales para clasificación supervisada de imágenes extraídas de los sensores remotos, se utilizará la metodología del estudio realizado por (Vargas Sanabria y Campos Vargas, 2017). En él expone los mejores resultados para clasificar la cobertura vegetal, basados en puntos de control en campo. Para profesionales expertos en evaluación de zonas en riesgos, el criterio más sencillo para asignar valores a los píxeles es la clasificación mínima distancia. Cuando se ejecuta se obtienen resultados adecuados, cuando la distancia entre clases es moderada. Por ello, clasifica todos los brillos, sin omitir ninguno porque siempre existe una clase más cercana para asignarle un valor (Yébenes Gómez y Giner Sotos, 2019).

1.1.16. Estudio de suelos empleando sensores remotos

Se cuenta con una categorización para las imágenes obtenidas del sensor Landsat para evaluar zonas urbanas. En ella, se aplican las herramientas digitales para el análisis y procesamiento de la data digital y se fundamenta en factores, como resolución espacial, resolución temporal, cobertura y facilidad de acceso a la información en páginas gratuitas para la obtención de imágenes satelitales.

La clasificación de la cubierta vegetal en el área de estudio, de la información derivada de los sensores remotos, se utilizará la sistematización del mapa mundial de suelos, en el que ha sido aceptado por la comunidad científica de suelos en el mundo (FAO, 2019), para una correcta clasificación.

Figura 6. Valores de reflectancia de suelos

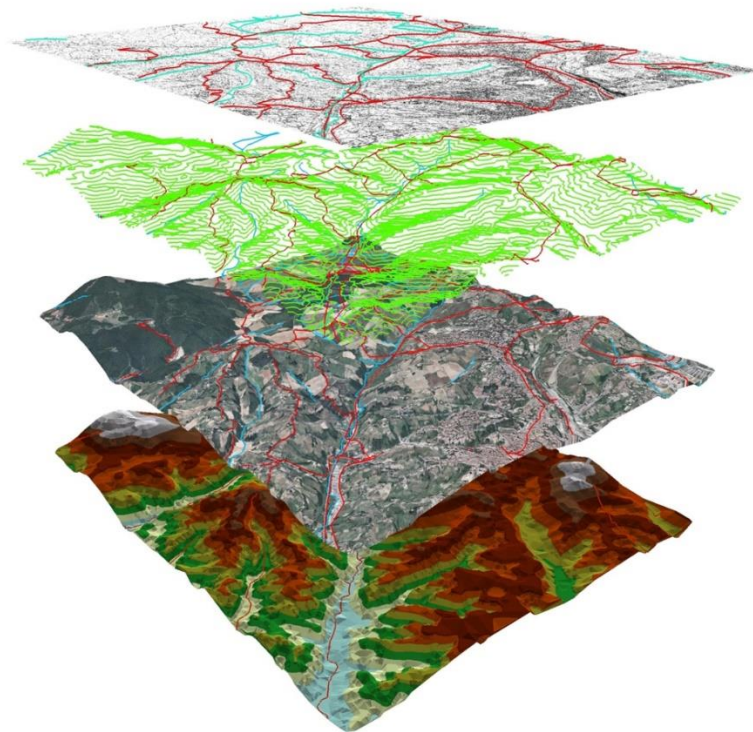


Fuente: FAO (2019). Portal de suelos de la FAO.

1.1.17. Mapas temáticos

Esta información se obtiene de las evaluaciones en los sistemas de información geográfica. Sirve para representar, de forma visual, las características de los fenómenos geográficos de tipología diversa. Esta información puede publicarse en la web para realizar evaluaciones emergentes y determinar las zonas más importantes por evaluar (IMASGAL, 2019).

Figura 7. Representación de mapas temáticos



Fuente: Air Drone View (2016). *Sistemas de información geográfica.*

1.1.18. Análisis y procesamiento de imágenes por sensores remotos

Cuando se recopila información técnica, se deben conocer conceptos relacionados con el espectro electromagnético y cómo influye la energía radiante en los cuerpos sobre la corteza terrestre. Como resultado se obtienen las tipologías que caracterizan una imagen digital.

Para interpretar y procesar imágenes obtenidas a través de sensores remotos por medio de la teledetección deben comprenderse las técnicas de clasificación, sus conceptos básicos, conocer las bandas espectrales para definir los rangos de cobertura de las zonas por evaluar y georreferenciación para la elaboración de mapas de prevención. Para varias aplicaciones se necesita una precisión geométrica, por ejemplo, la superposición de los mapas debe corregirse mediante el proceso de georreferenciación (Reuter, 2002). Esto ha facilitado la exploración de la corteza terrestre por medio de sistemas de información geográfica, aplicables a la gestión de riesgo o a la planificación para un ordenamiento territorial (Vargas R. , 2010).

Estudios realizados enmarcados en la teledetección, han permitido los análisis de fenómenos naturales alrededor del mundo, destacándose en Perú y Colombia los trabajos efectuados (Vargas, 2002), a partir de una tesis doctoral se han derivado artículos de los procesos morfodinámicos y su aplicación usando sensores remotos. Otros autores que se han destacado son (Robertson, Actividad neotectónica del piedemonte de la cordillera Oriental, 1989), (Robertson, Morfotectónica y dataciones del fallamiento activo del piedemonte llanero, 2005) y (Villajos, 2006), describen la geometría de la escena actual por medio de imágenes que han sido tomadas en el tiempo exacto; estos modelos captan el panorama, la información sobre su distancia focal, la distorsión e

información complementaria acerca del sensor remoto, brindando una menor tolerancia de error. Cuando se describe la teledetección hace referencia a un conjunto de técnicas para determinar a distancia las propiedades y objetos que se encuentran en la superficie terrestre, a partir de las radiaciones que ellas reflejan o emiten en diversas longitudes de onda (Chuvienco, 1996).

La fotografía aérea permitió conocer los fenómenos regionales (Melo y Chávez, 2005). Con el avance de la tecnología, los sensores ópticos aportaron más información por medio de una nueva matriz de los ambientes abióticos y bióticos. Por medio de esa interacción se construyen sistemas para cuantificar y visualizar los espacios urbanos, la destrucción de los bosques y los desequilibrios ambientales generados por el asentamiento de los núcleos humanos y el uso de suelos para producción agrícola. (Ferrel y Bustos, 2015).

En la actualidad, se han creado modelos de elevación digital del terreno (DEM) que han facilitado mayor conocimiento para la modelación de diferentes escenarios versus una cantidad significativa de variables con un alto grado de precisión la dinámica de la geoforma (Atkinson, 2005). De esta forma se ha obtenido una representación visual y matemática de los valores de altura, cuya cota de referencia es el nivel medio del mar. Como consecuencia el relieve y los elementos del contexto se han especificado de mejor manera. Un equipo de cómputo procesa los valores que contiene un archivo ráster con estructura regular. Esa información representa las cualidades de exactitud y su resolución horizontal (INEGI, 2017).

Los que son usados con mayor frecuencia son el K-media y el de agrupamiento ISODATA. Ambos son algoritmos iterativos que, de manera arbitraria, asignan un vector clúster y clasifican la imagen satelital en píxeles (Jensen, 1996). El procesamiento de estos dos algoritmos es similar, aunque se diferencian en que

con el ISODATA se clasifican diferentes números de grupos, mientras que el k-medias asume un valor para el número de conjuntos para minimizar la variabilidad dentro del clúster. Para el procesamiento de los datos en este estudio se utilizará este último algoritmo que ofrece una mejora en la división y fusión de las agrupaciones (píxeles).

La distribución de cada píxel y el valor que adquiere en el espacio se logra a través de una combinación de bandas espectrales. Se parte de la teoría que enuncia que cada cuerpo emite su propia energía (Planck, 1900). La segmentación se realiza por medio de zonas o regiones con características similares. Se han desarrollado modelos para detectar zonas con laderas onduladas originadas por suelos blandos o por fallas de tipo rotacional (Hervás y Rosin, 2001).

Toman como línea base el espectro de una imagen (Wang Y He, 1991), de esta forma se selecciona una zona patrón en la imagen denominada sub-imagen. Esta debe incluir, al menos, un área correspondiente a un deslizamiento previamente identificado. Se extrae el espectro textural de la imagen que constituye la referencia y el punto reconocido como vulnerable. Al interpolarlas, se calcula una distancia de correspondencia para cada espectro, normalizado en un rango de 0 a 255 en la escala de grises. De esta manera se obtiene el grado de probabilidad de pertenencia a un deslizamiento.

Dado al crecimiento antrópico en el noroeste la ciudad de Guatemala se hará un análisis multitemporal de una década para establecer la clasificación de las bandas electromagnéticas y el registro de las imágenes para obtener mejores resultados en la interpretación de las composiciones de los suelos y macizos rocosos. (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, y Oteo, 2002).

Por medio de estas técnicas se revelan los desplazamientos diferenciales de terrenos y se obtiene un margen amplio por implementarse en estudios geotécnicos, por ejemplo, la detección de fallas, deslizamientos de laderas, movimientos de glaciares, erupciones volcánicas.

Se harán combinaciones de bandas permitiendo identificar zonas procedentes de aportes fluviales, cambio en la cobertura vegetal, expansión del área urbana: también establecer aquellas anomalías térmicas en los procesos dinámicos de la tierra. (Obregón, 2005), hace de su uso las imágenes satelitales como herramienta de apoyo para la descripción de los fenómenos terrestres.

La investigación se limitará a identificar las zonas vulnerables a deslizamientos causados por las lluvias y cambio de usos de suelos. Los parámetros más representativos de la corteza terrestre se evaluarán mediante ensayos de laboratorio y se clasificarán según la AASHTO M-145 y los datos de precipitación registrados por el INSIVUMEH durante quince años y se compararán con las imágenes de satélite obtenidas por medio de la teledetección. Para codificar los datos se aplicará una clasificación supervisada, donde el píxel de identidad conocida es ubicado dentro de la zona por evaluar. De esta forma se catalogarán píxeles con variables desconocidas. El geoprocésamiento abarcará etapas de entrenamiento, selección del algoritmo para su categorización y operaciones postclasificación.

A partir de la revolución industrial, el ser humano ha necesitado identificar el entorno que lo rodea, por ejemplo: la topografía, cartografía, geografía y fotogrametría y la meteorología. Cuando iniciaron estos estudios, para obtener los datos se necesitaban equipos especializados, según la zona de estudio que se deseaba evaluar. Como consecuencias, las áreas inaccesibles quedaban excluidas de estos procesos de reconocimiento.

A partir de la década de los ochenta el desarrollo y optimización de almacenamiento de datos evidencia niveles sin límites de conocimientos. En la actualidad, la recopilación de la información puede realizarse en ausencia de los especialistas en prevención de desastres. El error técnico e interpretación *in situ*, con frecuencia se asocia a variables donde la naturaleza y el origen antrópico es complejo correlacionar. Los procesos para recopilar una gran cantidad de datos resultan sencillos porque modelan distintos escenarios que pronostican resultados instantáneos acerca del ambiente.

Por lo anterior y dado al desarrollo y expansión de las áreas urbanas e infraestructuras asentadas en lugares no aptos para construcciones es importante realizar estudios que propicien alertas tempranas de deslizamientos. También deben considerarse las condiciones socioeconómicas, climas extremos agravados por el cambio climático, las amenazas geológicas, deslizamientos de suelo y rocas inducidos por sismos.

1.1.19. Proceso de registro de información satelital

La metodología para la interpretación y procesamiento de una imagen digital consiste en la manipulación de:

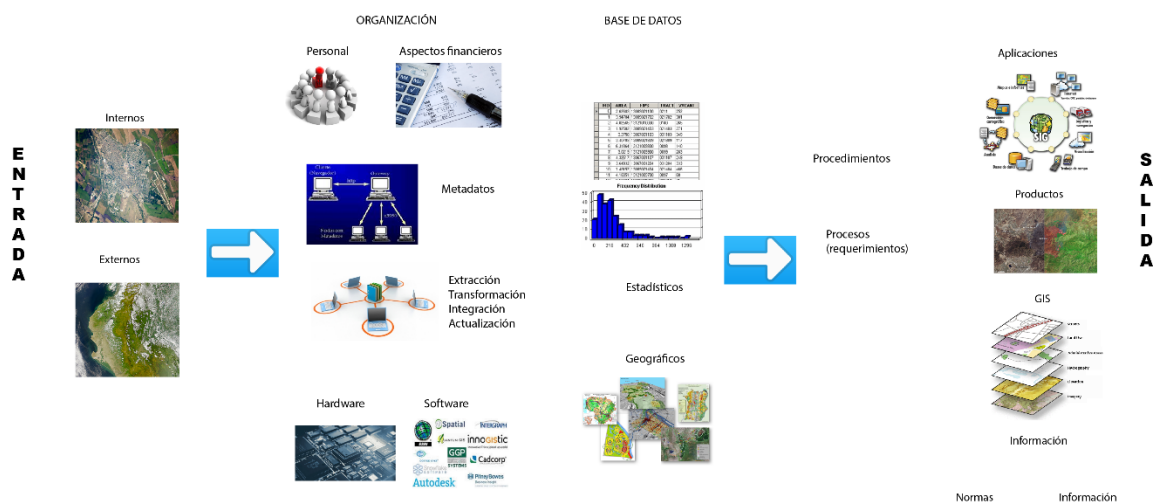
- Preprocesamiento
- Realce
- Clasificación

En la planificación de una investigación inicial que se considera como un dato crudo se debe agregar un procesamiento para efectuar las correcciones de la geometría de la zona por evaluar y la distorsión radiométrica, para suprimir el ruido. Los factores son valores de brillo de los píxeles, según la estacionalidad y

condiciones climáticas, como a efectos vinculados a la instrumentación. Esas correcciones atmosféricas pueden convertirse en un razonamiento complejo. Tomando como línea base modelos físicos sobre el comportamiento de la radiación, la aplicación cotidiana de estas ecuaciones matemáticas es imposible en la actualidad. Por ello, su aplicabilidad se basa en la estimación de histogramas de una imagen espectral, donde un gráfico o tabla, representa el número de píxeles, el cual posee un valor según la resolución del sensor remoto.

Los efectos instrumentales de error en una imagen satelital están ligados a las anomalías de los detectores del sensor; por ejemplo, los ajustes cuando se manipula el brillo de los píxeles registrados, emparejándose con la imagen digital original. La distorsión geométrica según el área que se esté evaluando, deberá comprobarse un sesgo de escaneado, en cada barrido del satélite, cuya velocidad no se estima constante, debido a los periodos de tiempo en que fueron capturadas las imágenes digitales.

Figura 8. **Proceso de recopilación para procesar imágenes satelitales**



Fuente: Espinosa (2008). *Uso de imágenes satélite en la ronda censal 2010 en México.*

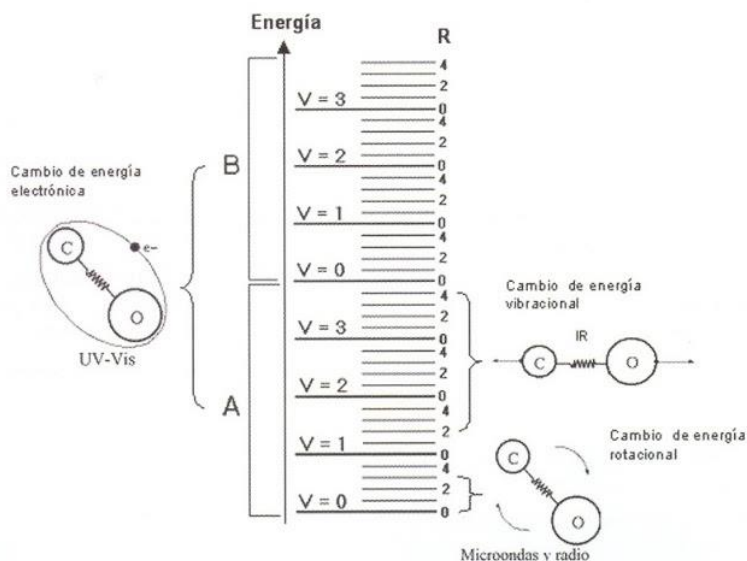
El registro que recopila una imagen obtenida por sensores remotos puede representarse en forma de datos. Se debe ser cuidadoso con la forma como se clasifica la altura, temperatura, clasificación de los suelos, entre otros, cuyos valores son denominados radiométricos y los conforma una malla de celdas que definirán un objeto del mundo real generado por su contraste en escala de grises.

Los elementos ligados a los registros digitales se asocian a fuentes de transmisión y energía, la reflectancia propia de los objetos, la presencia del satélite que recibe la respuesta remanente de energía, un receptor que se encuentra en la tierra para la recolección y evaluación de la calidad de información que estará al alcance de los profesionales para su interpretación.

1.1.20. Interacción de la energía con la corteza terrestre y su clasificación de la firma espectral

Los objetos físicos están formados por sistemas moleculares atómicos. Se interpretan como una suma de varios objetos, asociados a la energía traslacional y de vibración; por naturaleza se encuentran en un estado de equilibrio, sujetos a limitantes restricciones de la mecánica cuántica, debido a que no pueden tomar distintos valores discretos. A esto se le denomina un nivel energético.

Figura 9. Niveles energéticos moleculares



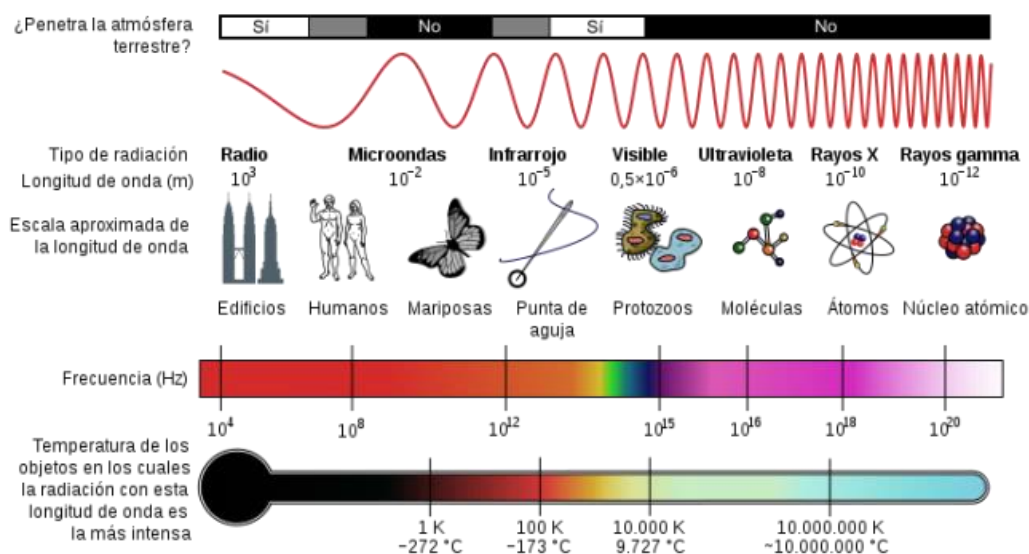
Fuente: Ramanujan (2012). *La sorprendente química del espacio*.

Las distintas longitudes de onda que representa la radiación electromagnética identificada con las siglas REM tienen una longitud de onda continua, pero exponen una diferencia desde un período de onda corto a longitudes de onda largas (televisión y radio). Su extensión va desde centímetros, metros, miles de kilómetros y la fracción del tamaño de un átomo.

El espectro electromagnético denominado simplemente espectro, se ha fraccionado en distintas regiones, según los fenómenos físicos para la sustitución de los electrones, la vibración molecular, su rotación y las fluctuaciones de los campos magnéticos y eléctricos. En la actualidad ha contribuido a explicar la existencia de moléculas en fase gaseosa y de especies químicas en fase sólida.

Los objetos son reflejados independientemente como rayos gamma, rayos X, ultravioleta, visible, infrarrojo, radio de televisión y microondas. Pero cuando se describe una imagen satelital, a través de sensores remotos, los rangos más empleados para los análisis son el visible, el infrarrojo y las microondas. Esto permite que se conjugue una gran cantidad de imágenes disponibles comercialmente.

Figura 10. **Frecuencias y longitudes de onda, correspondiente al espectro electromagnético**

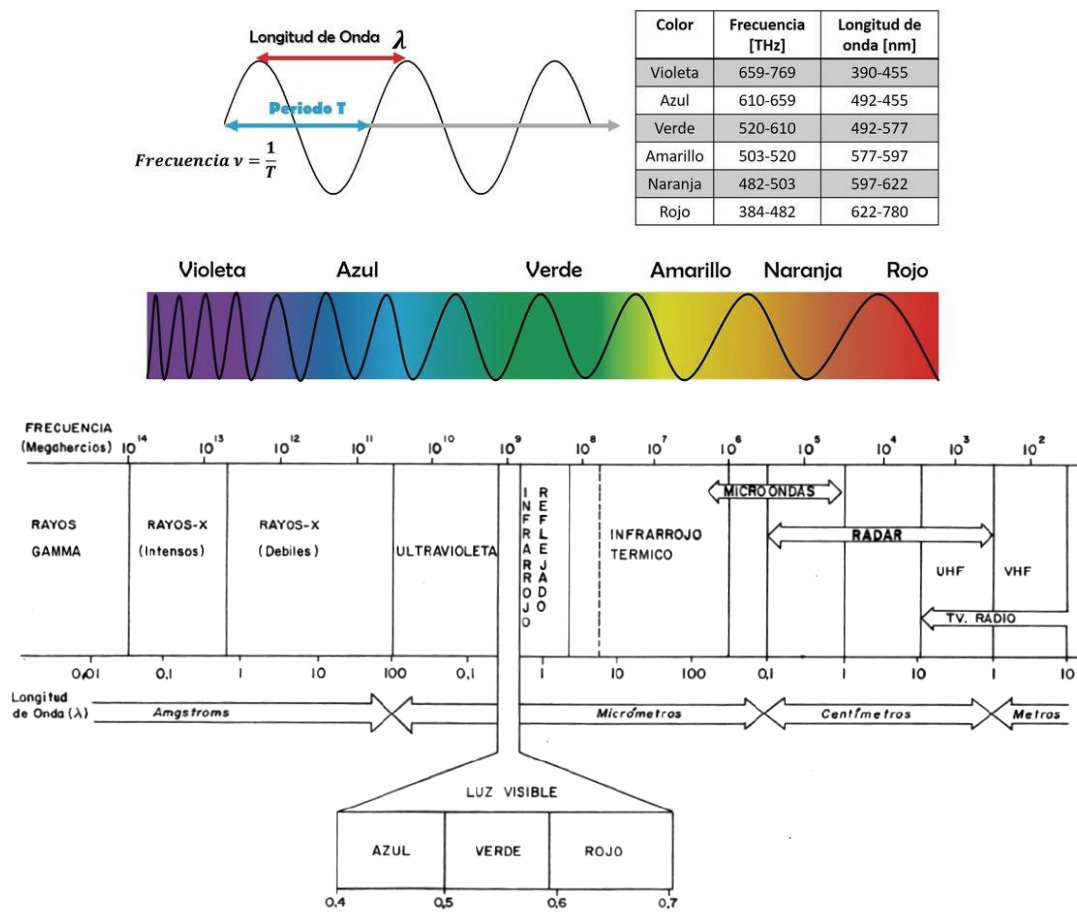


Fuente: Ramanujan (2012). *La sorprendente química del espacio*.

En un sensor remoto, es peculiar categorizar las ondas por la ubicación de su longitud de onda en el espectro electromagnético, que se mide en micrómetros correspondiente a 1×10^{-6} m (Lillesand Y Kieffer, 1994), pero no se tiene definida una frontera para una región espectral nominal, debido a las distintas metodologías para su determinación, que comprende un intervalo conocido por un tipo de radiación de característica propia de su longitud y frecuencia. Gran

parte de los sistemas remotos funcionan en varias fracciones o una porción visible del infrarrojo o microondas del espectro. La energía del infrarrojo termal se agrupada con la temperatura.

Figura 11. **Representación del espectro electromagnético en la región de la luz visible**



Fuente: Villalon (2017). *ResearchGate*.

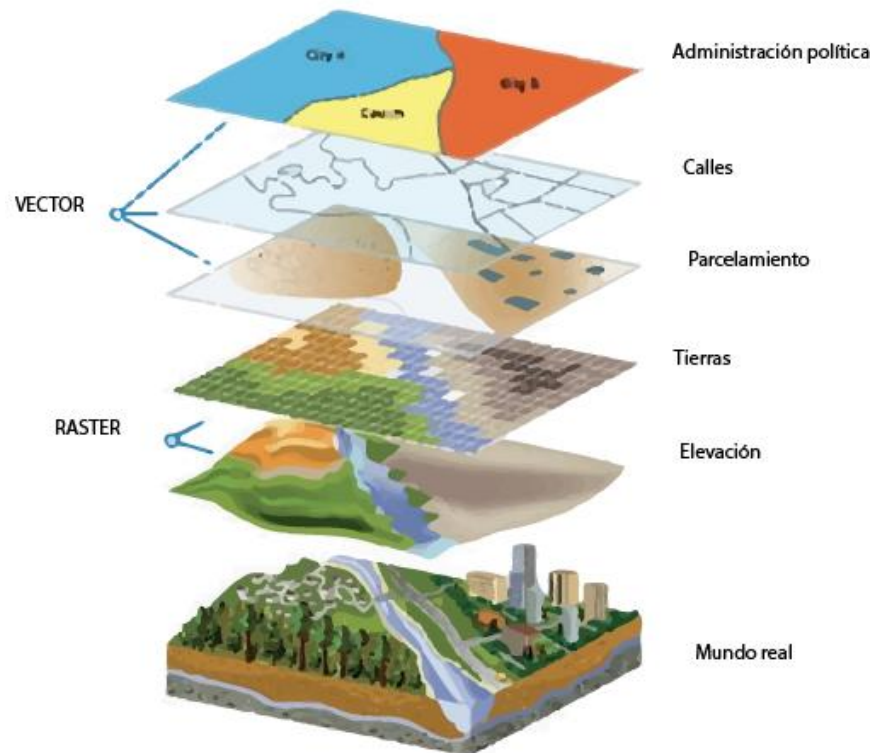
Para definir las unidades de medida en longitudes de onda, por facilidad y práctica, la región espectral sugerida, se centrará en regiones conocidas, como la visible y el infrarrojo; asignándoles la nomenclatura de micrómetros o micras ($1 \mu = 10^{-4} \text{ cm}$), en caso de los nanómetros ($1 \text{ nm} = 10^{-3} \mu\text{m}$), finalmente para regiones del radar convendrá emplear los centímetros.

1.1.21. Características para la visualización de una imagen satelital

En los estudios de la percepción remota relacionados con imágenes digitales, su estructura ráster o de malla, cada celda tiene un valor radiométrico, de modo que puede expresar valores relativos de reflectancia, emitancia que describe a la temperatura de cada objeto y los coeficientes de retrodifusión.

En comparación con un formato vector, por ejemplo, fuentes de agua, está asignado un valor de píxel, es su conjunto de distintas asignaciones las que describen los elementos. En un vector el objeto se describe por un valor o texto como atributo descriptivo de un polígono, línea o punto.

Figura 12. **Comparación de una imagen satelital, vector y ráster**



Fuente: Lozada (2017). *GEOPAISA*.

Antes de procesar una imagen satelital se reconocen detalladamente los píxeles o celdas, cuyos valores arbitrarios (tamaño, ubicación y forma) quedarán en función del sensor que realiza la captura de la imagen. Por ello, su evaluación no dependerá de las condiciones y propiedades *in situ*; sin embargo, deben estimarse las características propias del terreno, donde un píxel puede incluir varios tipos de objetos.

La radiación reflejada estará compuesta por las distintas firmas espectrales de las diversas clases temáticas que se pueden describir en sistemas de información geográfica, dirigido a una correcta interpretación.

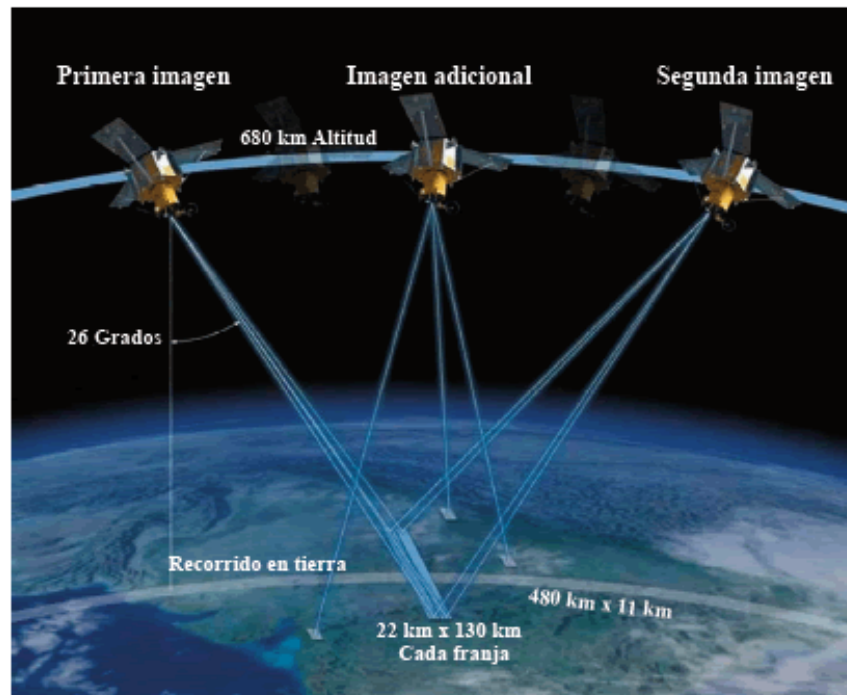
1.1.22. Imágenes satelitales gratuitas

Las alternativas para obtener imágenes digitales a través de distintas plataformas gratuitas deben contar con tres factores fundamentales para su adaptación:

- Los sensores deben contar con sensores pasivos, donde la energía reflejada por la superficie terrestre su fuente principal es la radiación solar.
- Imágenes satelitales disponibles en la web.
- Conocimiento, capacitación, como criterio para su categorización, logrando un adecuado manejo de datos.

Las publicaciones del Desarrollo del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGC) pueden consultarse en línea y descargar las zonas que se deseen evaluar. De este sitio pueden descargarse las imágenes de los sensores LandSat, ASTER, MODIS, LIDAR, AVHRR y modelos de elevación digital, provenientes de STRM. Para usuarios nuevos reconoce los archivos con extensión *kml* o *shapefiles* e incluso permite dibujar sitios de interés.

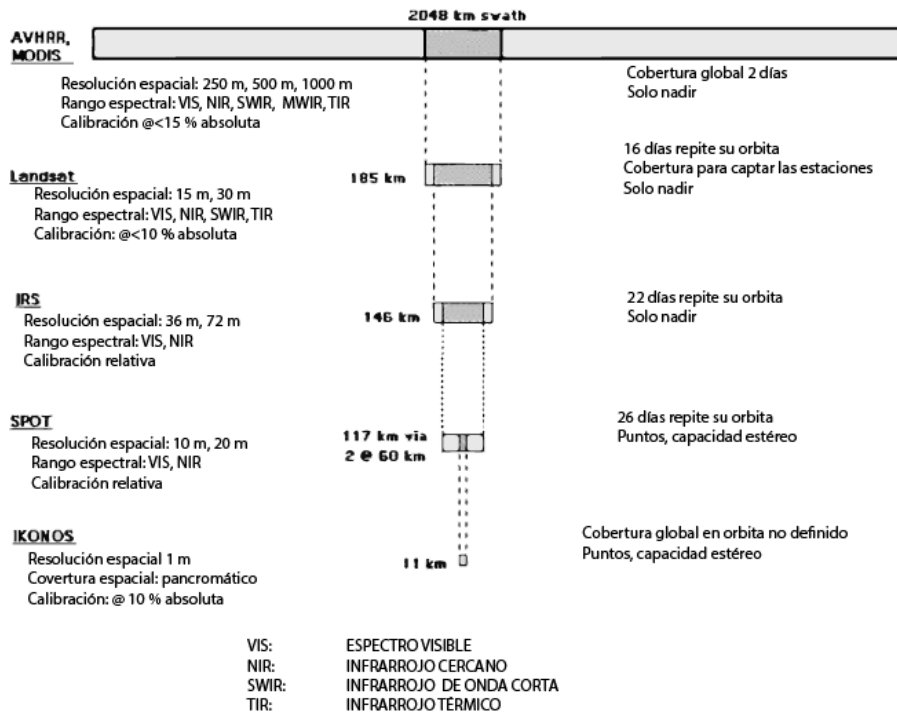
Figura 13. **Obtención de imagen digital a través de sensores remotos**



Fuente: Geospacial (2019). *Geoeye-1*.

La Unión Europea desarrolló los satélites del proyecto Copérnico, entre los que sobresalen Sentinel-2a y Sentinel-2b que han contribuido a la prevención de desastres. Se encuentran en la plataforma *Sentinels Scientific Data Hub*, de forma gratuita. Cuentan con doce bandas, tienen una resolución en un rango de diez a veinte metros de píxel, para el espectro visible y algunos infrarrojos, siendo la frecuencia de visita en un mismo punto cada cinco días.

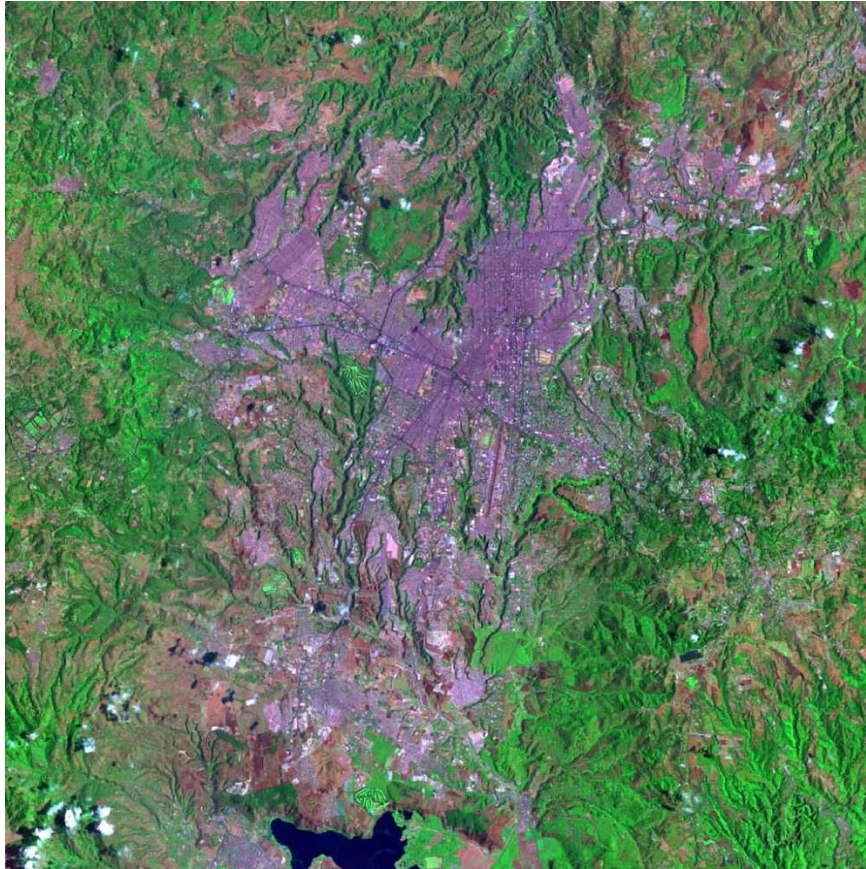
Figura 14. Características de distintos satélites dedicados a la teledetección



Fuente: García (2010). Landsat.

El satélite Landsat 8, como se aprecia en la Figura 7, recolecta imágenes alrededor de la tierra, cada dieciséis días. Estas imágenes están disponibles, sin ningún costo, en las plataformas Glovis, EarthExplorer o bien a través del Visor LandsatLook. Para procesar las imágenes digitales descargadas, se utilizan paquetes computacionales especializados que modelan las imágenes crudas para mejorar su visión por medio de la combinación de las bandas espectrales.

Figura 15 **Imagen satelital en alta resolución Landsat, ciudad de Guatemala**



Fuente: NASA (2017). *Socioeconomic Data and Applications Center (sedac)*.





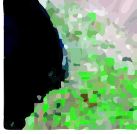
1.1.23. Características ambientales y escala para su medición

En los cuerpos de agua se genera reflectancia porque absorben intensamente el infrarrojo cercano y en las imágenes se ven como cuerpos oscuros. Esto puede ocurrir a distintas longitudes de ondas por la interacción con la corteza y se le denomina reflexión especular. El agua clara absorbe una cantidad mínima de energía, en un rango inferior a $6 \mu\text{m}$, pero si se aplica el análisis fisicoquímico

denominado parámetro ambiental “turbidez”, la reflectancia en el visible aumenta rápidamente. La clorofila mezclada con el agua varía las longitudes de onda.

Para los suelos, son monótonos los valores de longitud de onda y los valores de factores ambientales, como humedad, rugosidad, presencia de minerales, materia orgánica, están vinculados a su textura. Por ejemplo, suelo con índices de plasticidad baja (arenas), los tamaños de las partículas son grandes y están bien drenados por lo cual presentan alta reflectancia; en cambio en suelos no bien drenados, la rugosidad como la cantidad de materia orgánica, expone una disminución de su reflectancia en la región visible del espectro electromagnético.

Figura 16. **Combinación de bandas RGB para Landsat 8**

| | Descripción | Landsat 8 |
|---|-----------------|-----------|
|  | Color infarrojo | 5,4,3 |
|  | Color real | 4,3,2 |
|  | Falso color | 6,5,4 |
|  | Falso color | 7,6,4 |
|  | Falso color | 7,5,3 |

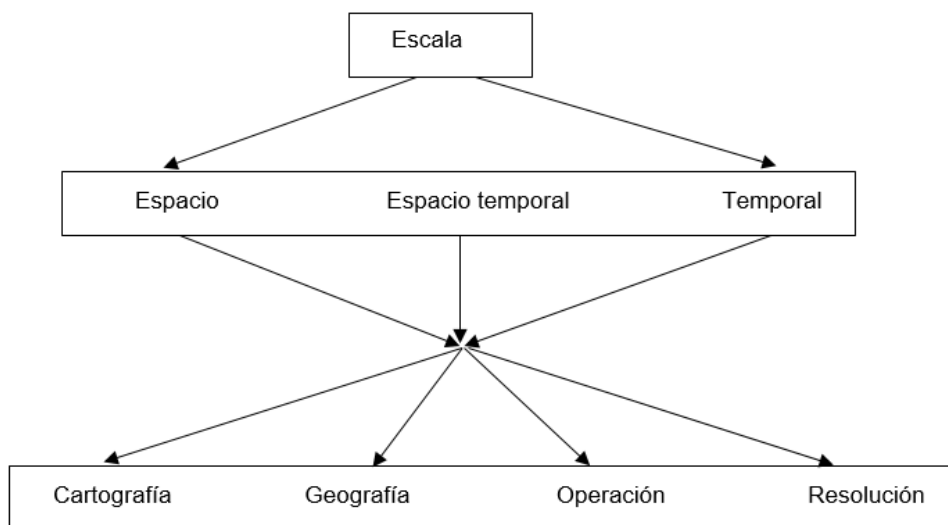
Fuente: U.S. Geological Survey (2019). *LANDSAT USGS*.

La escala es uno de los parámetros sugeridos como primarios (Quattrochi y Goodchild, 1997) para describir la geografía, en el cual sus atributos estarán en función del contexto de disciplina que se esté identificando *in situ* a analizar. Con el rango espacial ver la figura 17, se tiene como resultado cuatro variables de medición: cartografía, geografía, escala de operación y resolución.

- Cartografía: especifica proporciones, como distancias sobre un mapa. Una gran escala en un mapa define poca información cuando se evalúa áreas pequeñas, generalmente es necesario recopilar una mayor información; en cambio una pequeña escala, da una visualización precisa del sitio.
- Geografía o escala que se utilizará para la observación: delimita el espacio de interés, para abarcar una mayor superficie de estudio puede emplearse escalas grandes; en cambio, una escala menor no describe la geografía en pequeñas áreas que se deseen procesar.
- Escala de operación: concreta el porcentaje de procesamiento – ambiente; sin embargo, también se denomina escala de acción. Las nuevas metodologías sugieren que sea referida con este concepto. Está vinculada con los fenómenos meteorológicos y posición geográfica, donde estas alteraciones atmosféricas observadas, pueden no existir en otra escala operacional.
- Resolución: enfatiza en los tamaños de los objetos por evaluar, considerando la resolución como una escala de medida, donde detalla las fracciones pequeñas de los objetos.

Estos cuatro factores de medida están estrechamente relacionados. Por ejemplo, una escala pequeña en cartografía, se analizan solo los procesos que pueden ser vinculados a observar en un mapa con una superficie concreta. En cambio, los sensores de teledetección, una escala de 30 m es la medida de un píxel o resolución espacial; pero los números de infraestructuras, cuerpos de agua, etc., en un píxel se organizan mediante una escala geográfica para mejor comprensión y valoración de quienes realizan la intervención.

Figura 17. **Escala para mediciones de imágenes satelitales**



Fuente: Quattrochi y Goodchild (1997. *Scale in remote sensing and GIS*)

De acuerdo con las definiciones y conceptos de escalas, la medición y tamaño es relativo, igual que su representación espacial; por ello, en muchos casos el término escala puede incorporar todas esas mediciones, según el contexto. La escala de medición estará en función de una propiedad geográfica inherente de los fenómenos naturales - antrópicos, calificados como un cálculo dependiente.

1.2. Riesgo, amenaza y susceptibilidad

La evaluación del concepto de riesgo parte de la peligrosidad vinculada al proceso específico denominado causa del cual derivan las consecuencias; es decir, se relaciona con las zonas expuestas (infraestructuras, personas, viviendas), (González de Vallejo, *et al.*, 2002). Las medidas para la prevención deben incluir los distintos niveles de riesgo, que se evalúan con la siguiente expresión:

$$R = P \times V \times C$$

En la cual **P** es la peligrosidad del evento en análisis, **V** la vulnerabilidad de esos elementos expuestos a la acción y **C** el costo o valor de las consecuencias resultantes de los procesos de deslizamientos. Especialistas en gestión de riesgos han definido la primera variable descrita en la ecuación, donde **P** es una probabilidad y **V** es una variable adimensional, **C** puede ser expresada en términos probabilísticas o bien deterministas. El riesgo es una probabilidad.

1.2.1. Análisis de riesgos

La evaluación el análisis del riesgo incluye consideraciones socioeconómicas que se caracterizan por las pérdidas potenciales debidas a fenómenos naturales y antrópicos. Este análisis puede ser cualitativo y cuantitativo.

1.2.2. Análisis cualitativo

En caso de evaluaciones rápidas de zonas propensas a riesgos por deslizamientos, se elabora un inventario de las amenazas, añadiendo elementos de riesgos y la vulnerabilidad a la que está expuesta. Las áreas propensas se identifican en función de sus atributos.

1.2.3. Análisis cuantitativo

El análisis cuantitativo considera los siguientes elementos (Renda, 2017):

- Las amenazas: se determina la distribución probable a un derrumbe y/o deslizamiento, para una zona o proyecto, se clasifica por medio de una distribución de frecuencia y magnitudes.
- Elementos en riesgo: su finalidad es generar e identificar los elementos distribuidos en zonas que pueden afectar, pérdidas de vidas humanas y predios.
- Análisis de vulnerabilidad, evalúa y mide el daño que afecta a las personas si ocurriera un deslizamiento.
- Análisis de riesgos: su cálculo se fundamenta en modelaciones aplicadas a la algebra probabilística o bien a métodos de simulación.

1.2.4. Procesos para una imagen digital a partir de sensores remotos

Por medio de la información digital cartográfica disponible y la descarga de imágenes gratuitas en plataformas diseñadas para evaluación de análisis de riesgos se construyen escenarios y se representan espacialmente, según la posición geográfica de la zona que se desea evaluar. Es importante generar mapas de baja complejidad para que los usuarios identifiquen las amenazas en caso de emergencia de perfil preliminar, de esta forma se precisa la vulnerabilidad (Renda, 2017).

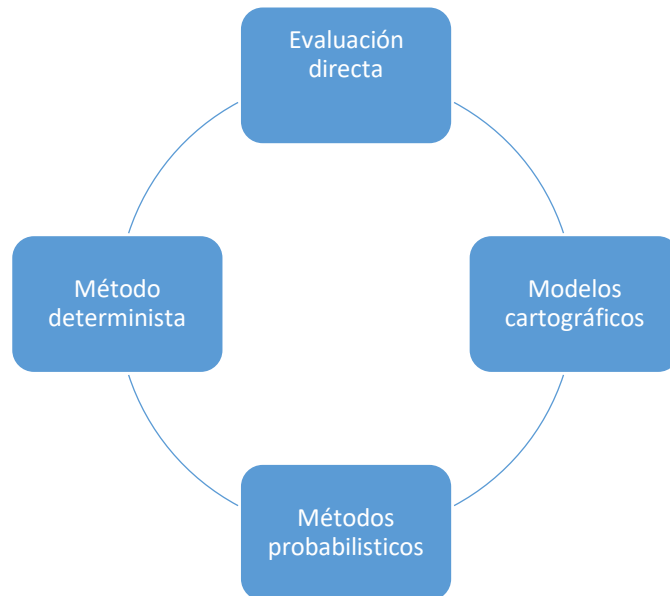
Los análisis de riesgo se refieren a una aproximación de los daños que puedan ocurrir en un evento que ocasionará desastres en distintos escenarios. Estos fenómenos se explican de acuerdo con la probabilidad de ocurrencia de origen antropogénico o natural. El análisis de riesgo es la obtención de conocimientos para tomar muestras que definan y caractericen la amenaza y su interacción en un punto geográfico.

De un análisis de amenaza se generan medidas y acciones para mitigar los efectos negativos de un evento destructor. El análisis incluye elementos negativos en la zona por evaluar, como origen, zona afectada, causas y consecuencias del problema (Desarrollo, Programa Delnet de Apoyo al Desarrollo Local, 2010-2011).

1.2.5. Procesos para la susceptibilidad a deslizamientos

El concepto de deslizamientos engloba los movimientos de masas, como caídas, derrumbes, flujos, entre otros. En los deslizamientos existen los factores condicionantes y los desencadenantes (González de Vallejo *et al.*, 2002). Con base en estos conceptos, se trazan mapas de susceptibilidad para identificar las áreas de construcción cercanas a laderas.

Figura 18. **Modelos para el proceso de mapas de susceptibilidad**



Fuente: González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, y Oteo (2002). *Ingeniería Geológica*.

1.2.6. Evaluación directa

Se realiza un estudio y reconocimiento de campo en el cual se usa como herramienta una fotointerpretación detallada de las zonas analizadas, ante un evento de deslizamiento, cuya escala de medición es media y grande.

1.2.7. Modelos cartográficos

Los sistemas de información geográfica permiten agregar, fácilmente, las variables y factores causantes de deslizamientos. Para su procesamiento, se emplean modelos matemáticos que evalúen a escalas pequeñas. La superposición de mapas representa los factores pasivos y activos.

1.2.8. Métodos probabilísticos

Este método tiene las características de un modelo cartográfico, pero puede establecer la frecuencia de los factores activos, como el período de retorno de las precipitaciones y de los sismos o bien de los propios fenómenos encontrados en el recorrido de campo, latentes ante la vulnerabilidad a un deslizamiento, en que su representación es escala media.

1.2.9. Métodos deterministas

Se basa en la evaluación y análisis de la estabilidad de taludes y/o terraplenes, de la zona que se está analizando, en el que se adecua únicamente a grandes escalas.

1.2.10. Método de Mora – Vahrson

Este método se basa en los modelos cartográficos. Se desarrolló y aplicó inicialmente, en Costa Rica, donde los profesionales dedicados al análisis de riesgos en la región de Centroamérica lo aceptaron. Este método permite identificar las áreas potenciales a deslizamientos, mediante la aplicación de registros de lluvias, sismos o la combinación de ambos; porque la metodología para desarrollar estas matrices se ejecuta e interpreta fácilmente, en áreas carentes de información para la evaluación de la estabilidad de sus laderas. Por medio de las herramientas SIG, los umbrales de alerta se identifican de manera ágil y económica.

1.3. Geología

Dado al desarrollo por la expansión de las ciudades y su crecimiento demográfico, es necesario realizar la recopilación de la información, regional y local, para identificar los distintos cambios que ha sufrido la tierra, desde su dinámica, estructura en sus distintos procesos natural o antrópico.

1.3.1. Geología regional

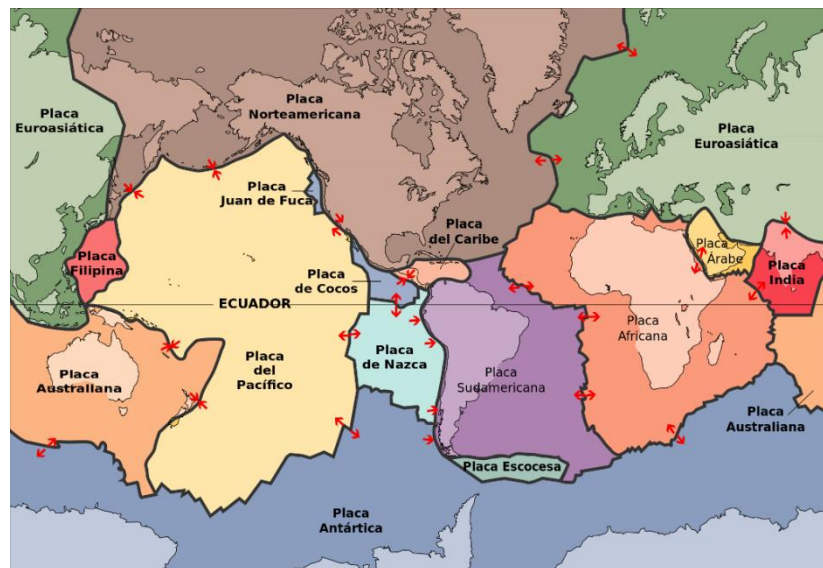
A partir del período del mioceno se desplegó un *substractum* de calizas cretácicas y rocas de tipo plutónicas, en la que se estima que culminó en la era cuaternaria, con emisiones focales que iniciaron la formación de grandes conos compuestos, en su mayoría, provienen los estratos de tipo pómez que conforman el relleno de las depresiones desarrolladas durante la fase volcánica en una de las etapas de la era cenozoica. Eventos tectónicos de una gran magnitud formaron las cordilleras volcánicas, cuya estructura es una gran medida litológica representativa de la región.

Sin embargo, los suelos volcánicos, especialmente de la era terciaria, están constituidos por rocas cristalinas cuyas ondas de corte, su velocidad es mayor a 750 m/s donde además la pómez de depósitos profundos y consolidados de piroclastos, primordialmente son compuestos de ceniza como también de pómez, cuyos espesores exceden los 60 m.

La litosfera no es una capa continua, se divide en varios bloques o placas que se desplazan a velocidades del orden de diferentes centímetros por año. Ese movimiento relativo entre ellas y sus deformaciones en los bordes causan terremotos, forman volcanes y cadenas montañosas. El movimiento y la composición de las placas es fundamental para analizar sus características o el

contacto entre ellas que puede ser divergente o generación de corteza, la destrucción de la corteza o convergente y transcurrente relacionada con la conservación de la corteza.

Figura 19. **Placa tectónica en que se fragmenta la corteza terrestre**



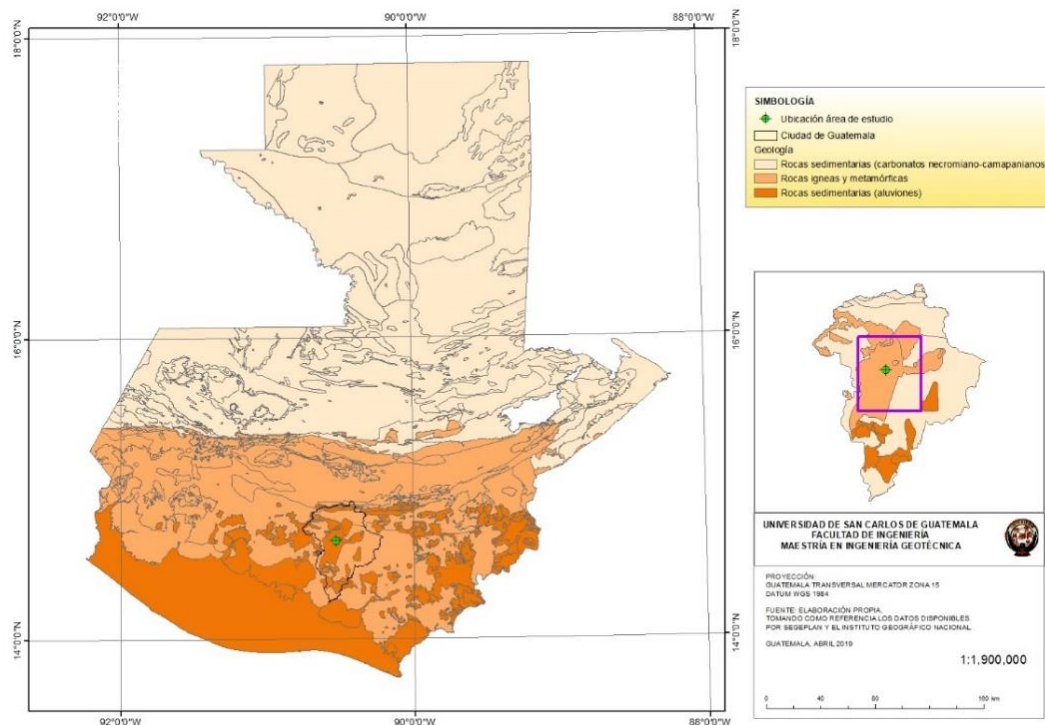
Fuente: U.S. Geological Survey (2019). *Geología y superficie de la tierra*.

El movimiento constante que aún se presenta en la tectónica de la litosfera sobre el territorio nacional está repartido entre las placas Cocos, Caribe y Norteamérica. De este desplazamiento de placas surgen las fallas y sus efectos. Entre ellas, destacan la falla del Motagua, cuya su orientación en forma de arco está distribuido en dirección oeste–noreste y la de Jalpatagua de ubicación noroeste–sureste.

El paisaje actual del altiplano presenta un cinturón volcánico que se distingue por un relieve orográfico agreste, donde los agentes ambientales como la erosión, lluvia, fisuración térmica, erosión química entre otros denotan que la era

cenozoica, estuvo regionalmente marcada por zonas con mucha humedad. Las formaciones de lagunas y lagos evidencian vestigios de la sedimentación a lo largo del altiplano con formación sobre las depresiones volcánicas (formaciones lacustres).

Figura 20. **Formación geológica territorio nacional**



Fuente: elaboración propia.

1.3.2. Rasgos hidrológicos regionales

La posición geográfica y el relieve del país son puntos fundamentales para la circulación de los vientos, que determinan las condiciones generales para la precipitación de la humedad atmosférica. Se observan zonas de influencia, como el caribe con dirección al noreste y regiones con tormentas tropicales, tal es el caso en el océano pacífico. Los valores del agua proveniente de la precipitación

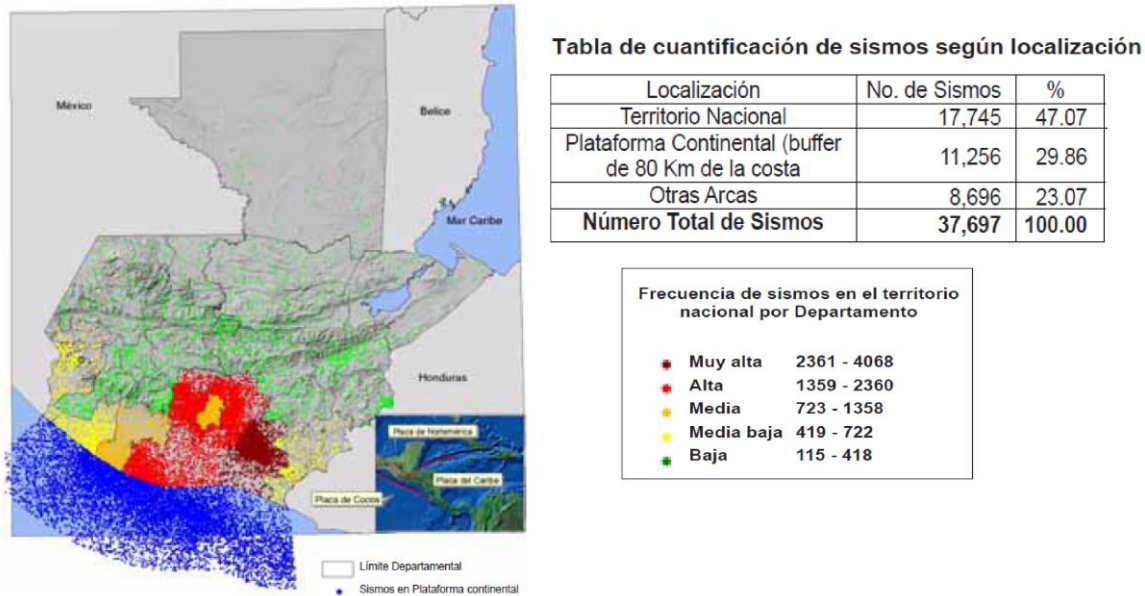
sobre el cinturón de la cadena volcánica son variables a todo lo largo de la superficie expuesta hacia el sur, conocida como la boca costa, que se localiza a 1000 msnm con una precipitación promedio anual de 4000 mm. En los valles del altiplano estos valores promedio tienen un rango moderado de 1000 – 2000 mm y sobre la cara expuesta con dirección hacia el norte, se tiene una reducción de lluvias a medida que se acerca al valle de la ciudad de Guatemala, cuyos registros son inferiores a 1000 mm (INSIVUMEH, IGN, ONU, 1978).

Los regímenes de las lluvias se extienden por un período aproximado de seis meses. Las características de las cuencas hidrográficas, definidas por sus unidades litológicas, determinan el almacenamiento de las aguas superficiales, cuya acumulación se reduce en las zonas con mayores pendientes las cuales se caracterizan por lluvias torrenciales, con tirantes de agua excesivamente altos y con una gran cantidad de arrastre de sedimentos. Durante la época de estiaje la lluvia se reduce abruptamente, pero se cuenta con un almacenamiento subterráneo donde los caudales observados en la vertiente del sur varían de 2 a 70 m³/s condicionados por la época de invierno.

1.3.3. Aspectos sísmicos

En la (USAC / UNICEF / UNEPAR / CONRED, 2001) se han realizado estudios para cuantificar los sismos. La base de datos la obtuvieron de los sismógrafos del Insivumeh los cuales indican el grado de amenaza originado por este tipo de fenómenos. También elaboraron un mapa para que se comprendiera más fácilmente. En la Figura 21 se muestra la influencia de la Placa de Cocos sobre el país. Las regiones con mayor amenaza son las cercanas al pacífico de ahí que los departamentos vulnerables sean Guatemala, Chimaltenango, Escuintla, Santa Rosa y Sacatepéquez (Universidad Rafael Landívar, 2005).

Figura 21. **Ubicación de frecuencia y eventos sísmicos**

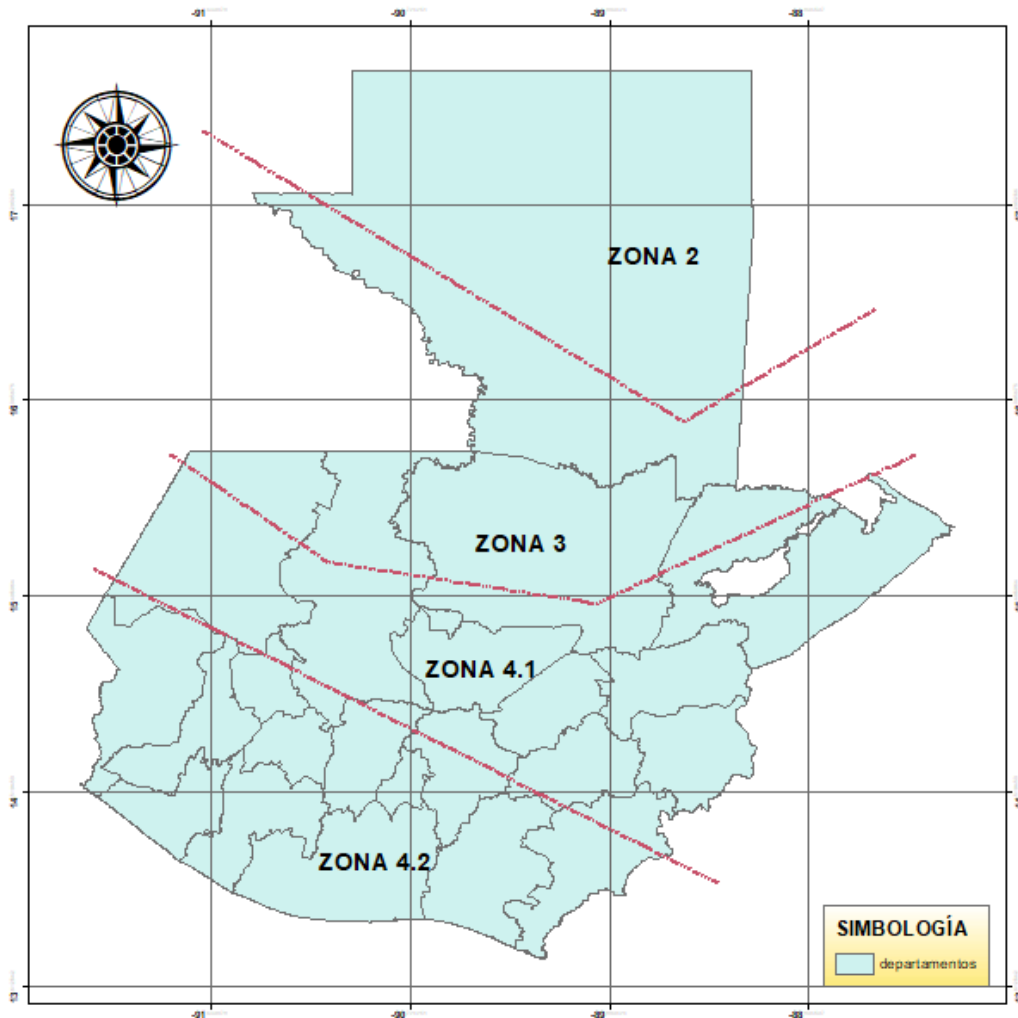


Fuente: Universidad Rafael Landívar (2005). *Amenazas al ambiente y vulnerabilidad social en Guatemala*.

Las normas de seguridad, los criterios de la geología y características del sitio pueden basarse en las Normas de Seguridad Estructural para Guatemala, publicadas por la Asociación Guatemalteca de Ingenieros Estructurales y Sísmica (AGIES), con el título *Demandas estructurales y condiciones de sitio*, NSE2, edición 2018.

En el capítulo 4 de la edición (Asociación Guatemalteca de Ingenieros Estructurales y Sísmica, 2018), se establecen los requisitos para la protección sísmica, requeridos para las condiciones sísmicas de cada localidad y clasificación según cada tipo de obra.

Figura 22. Zonificación sísmica



Fuente: Santana (1996). *Normas estructurales de diseño y construcción recomendadas para la República de Guatemala*

“La descripción sísmica se divide en tres categorías según la intensidad: (1) frecuente, (2) severa y (3) extrema” (Santana, 1996, p. 2), el nivel correspondiente a terremoto severo pertenece al nivel base. El terremoto frecuente se ubica en un nivel de aceleración más bajo en cada zona sísmica. El terremoto extremo se define como el evento que producirá un 30 % de incremento en los niveles de aceleración pico con respecto al caso severo.

Tabla II. **Niveles de intensidad sísmica**

| Zona Sísmica | I_o | A_o | A_f | A_e |
|--------------|-------|------------|---------------|---------------|
| 2 | 2 | 0.10g | 0.00g | g |
| 3 | 3 | 0.10 0.30g | 0.00 A 0.10 g | 0.13g a 0.39g |
| 4.1 | 4 | 0.30g | 0.10 a 0.15g | 0.39g |
| 4.2 | 4 | 0.30g | 0.15g | 0.39g |

Fuente: Santana (1996). *Normas estructurales de diseño y construcción recomendadas para la república de Guatemala*

1.3.4. Suelos

“Los suelos de la ciudad de Guatemala se han dividido en 26 unidades para clasificarlos. En ellas se incluyen 18 series de suelos, 3 fases de suelo y finalmente 5 clases de terreno misceláneos. A su vez, se han dividido en tres clases amplias: a) I. Suelo de la altiplanicie central, b) II. Suelos del declive del pacifico, y c) III. Clases mixtas de terreno” (Asociación Guatemalteca de Ingenieros Estrcuturales y Sísmica, 2018, p. 31).

- I. Suelos de la altiplanicie central: según la depresión de los suelos, la clase de material y su altitud, son suelos profundos sobre materiales volcánicos a gran y mediana altitud, son pocos profundos y están sobre materiales piroclásticos sólidos o débilmente cementados.
- II. Suelos del declive del pacífico: caracterizados por ser profundos sobre materiales volcánicos, poseen un color oscuro; en otras latitudes dentro de la región de la ciudad pueden visualizarse como mixtos, siempre manteniendo un aspecto fusco.

Tabla III. **Posición fisiográfica, material madre y características de los perfiles de los suelos de la ciudad de Guatemala**

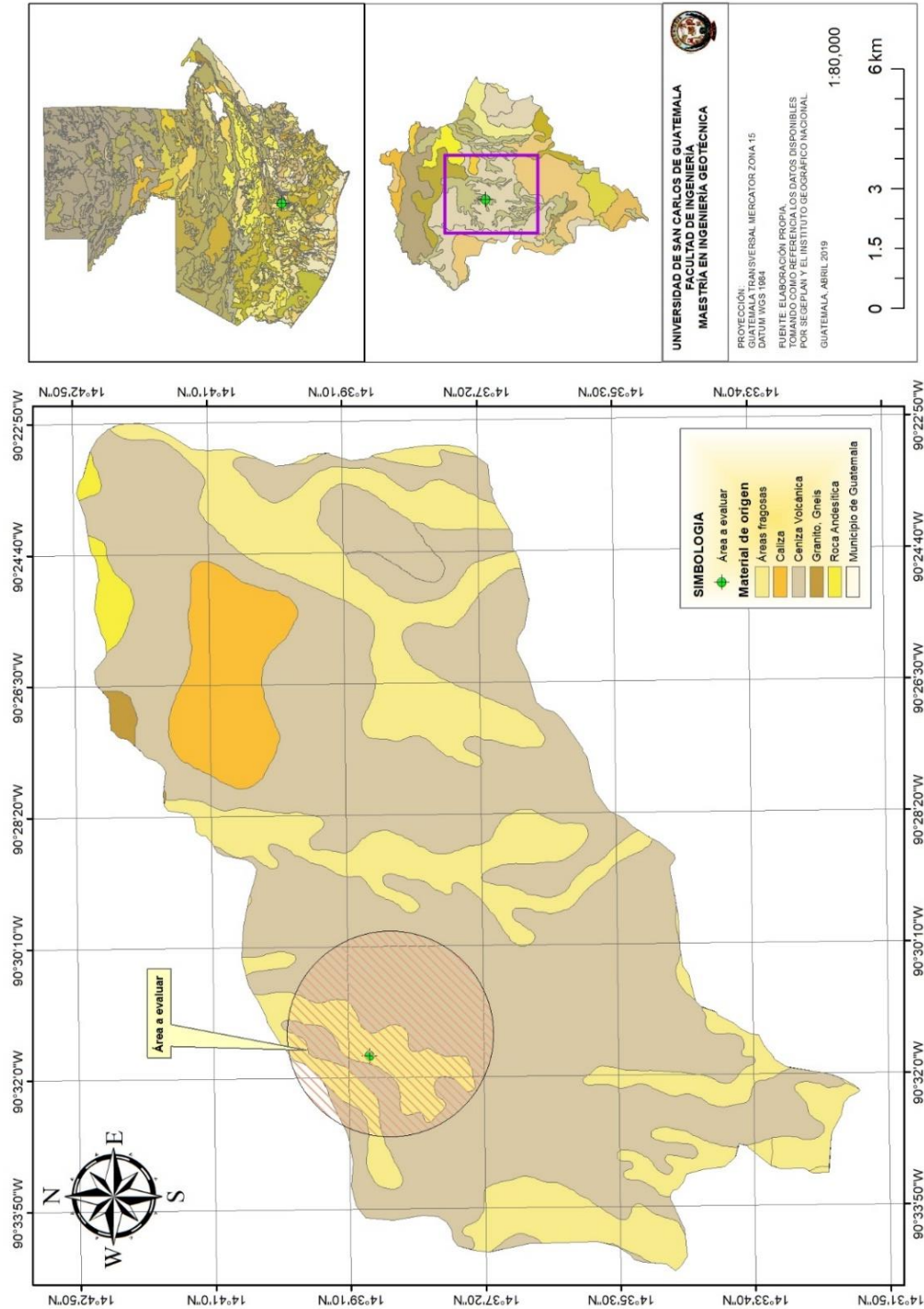
| Suelo superficial | | | | | | | |
|--------------------------|---------|--|------------|-----------------|-----------------|---------------------------|--------------|
| Series | Símbolo | Material Madre | Relieve | Drenaje interno | Color | Textura /Consistencia | Espesor (cm) |
| Guatemala | Gt | ceniza volcánica (pomácea color claro) | casi plana | Bueno | café muy oscuro | franco arcillosa, friable | 30 - 50 |

| Subsuelo | | | |
|--------------------|---------------------------------------|-----------|-------------------------|
| Color | Consistencia | Textura | Espesor aproximado (cm) |
| café rojizo | friable (plástica cuando se humedece) | arcilloso | 50 - 100 |

Fuente: Simmons, Tárano, y Pinto (1959). *Clasificación de Reconocimiento de los Suelos de la república de Guatemala.*

La altiplanicie central de la metrópoli está conformada por pendientes escarpadas con pequeñas zonas casi planas o valles ondulados, la mayoría de los suelos son poco profundos, no aptos para cultivos limpios intensivos. Se estima un área en la fase quebrada de 257 Ha que corresponden al Grupo I y para el Grupo III que son clases misceláneas, un área fragosa de 19,694 ha de suelos pocos profundos los cuales están sobre materiales volcánicos debidamente compactados (Simmons, Tárano, y Pinto, 1959).

Figura 23. Mapa de reconocimiento de suelos de la ciudad de Guatemala



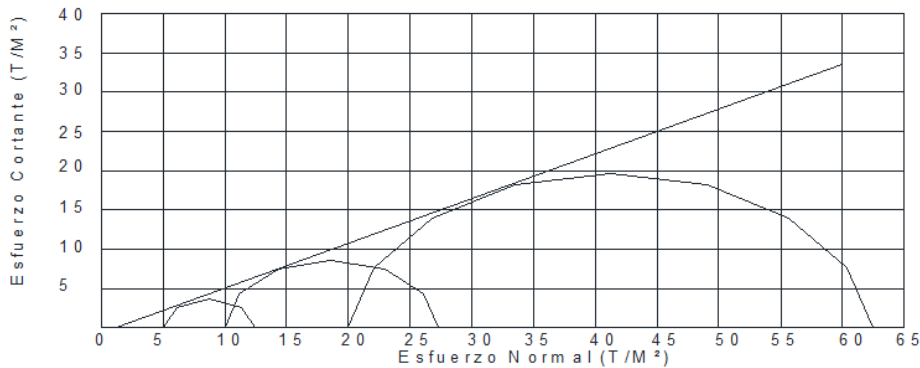
Fuente: elaboración propia.

1.3.5. Características del suelo

Una de las muestras se extrajo a una profundidad de cuatro metros en una zona aledaña al puente el Incienso, siguiendo la metodología *AASHTO T-234-70* o *ASTM D2850-70* que corresponde a la normativa para la determinación de ensayos triaxiales. Por su geología está conformada por roca de tipo volcánica que ha sido sometido a una consolidación. Una porción de material se sometió a los ensayos en laboratorio para determinar las características más relevantes.

Figura 24. Resultados obtenidos en los ensayos para el suelo

| ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA: $\phi = 29.63^\circ$ | | COHESIÓN: $C_u = 0.00 \text{ Ton/m}^2$ | | |
|--|--|--|-------|-------|
| Tipo de ensayo: | | No consolidado y no drenado. | | |
| descripción del suelo: | | Limo arenoso color café oscuro | | |
| dimensión y tipo de la probeta: | | 2.5" X 5.0" | | |
| Observaciones: | | Muestra tomada por el interesado. | | |
| Probeta No. | | 1 | 2 | 3 |
| Presión lateral (t/m²) | | 5 | 10 | 20 |
| Desviador en rotura q(t/m²) | | 7.46 | 17.24 | 42.48 |
| presión intersticial u(t/m²) | | x | x | x |
| Deformación en rotura ϵ_r (%) | | 1.5 | 3.0 | 5.0 |
| Densidad seca (t/m³) | | 1.31 | 1.31 | 1.31 |
| Densidad húmeda (t/m³) | | 1.51 | 1.51 | 1.51 |
| Humedad (%h) | | 29.44 | 29.44 | 29.44 |



Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala (2019). *Adaptado del ensayo triaxial para determinación de densidad, cohesión característica del suelo.*

Figura 25. **Valle de la ciudad de Guatemala**



Fuente: Aroche (2008). *El puente El Incienso*.

1.3.6. Descripción de la geomorfología del área de estudio

En la ciudad de Guatemala, los asentamientos reflejan las carencias de los servicios y la posibilidad de obtener suelos seguros para la vivienda. Esto obliga a un sector de la población a ocupar zonas no aptas para construcciones. Generalmente, estas zonas se ubican en áreas con topografía accidentada, en pendientes pronunciadas y con altos niveles de contaminación por falta de saneamiento. En estos puntos se concentran los índices de mayor vulnerabilidad y riesgo. (Platas López, y otros, 2016).

Cuando se fundó la Nueva Guatemala de La Asunción en el año de 1776, los pobladores enfrentaron dificultades para obtener una vivienda digna, lo cual se evidencia en el hacinamiento de algunos sectores. La inmigración hacia la capital propició la invasión de terrenos municipales donde se formaron asentamientos

humanos. Uno de ellos es El Incienso, del cual no se posee dato población porque el Registro Nacional de Estadística (INE) ha excluido a estas comunidades de sus registros.

Los gobiernos no han vigilado que las infraestructuras de los asentamientos cumplan con las especificaciones técnicas y menos aún, se han realizado estudios para su fundación. De ahí que se hayan situado en lugares inseguros, vulnerables a fenómenos, como amenazas geológicas, terremotos, tormentas tropicales, inundaciones, sequías y circunstancias sociales desfavorables.

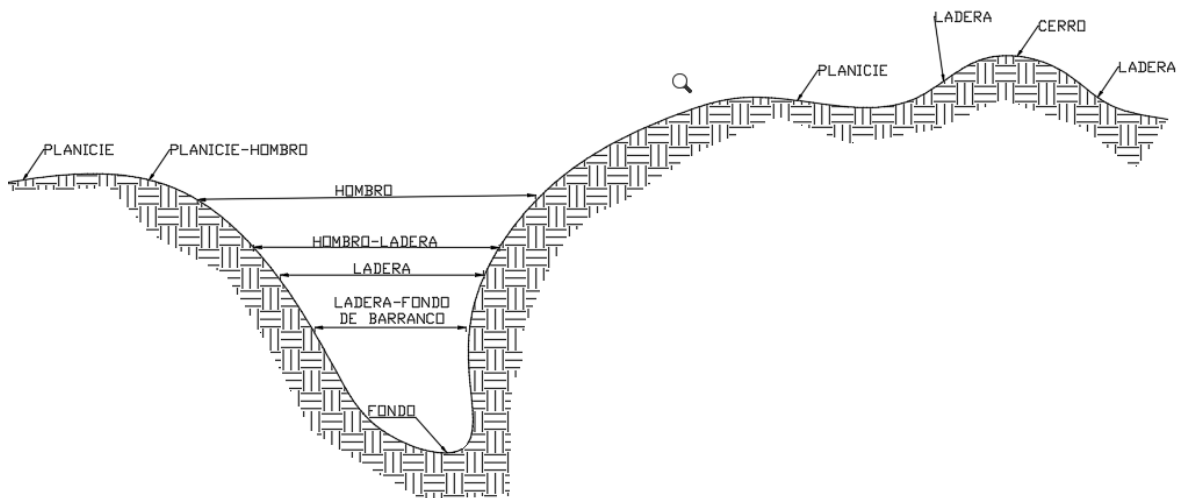
Tabla IV. **Tipo de perfil de terreno ocupado por los asentamientos en el área metropolitana en el año 2010**

| Características | No. de asentamientos | % de asentamientos |
|-----------------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Cerro | 13 | 3.3 |
| Planicie | 26 | 6.6 |
| Planicie – Hombro | 70 | 17.6 |
| Hombro | 36 | 9.1 |
| Hombro – Ladera | 62 | 15.7 |
| Ladera | 3 | 0.8 |
| Ladera – Fondo de barranco | 176 | 44.4 |
| Fondo de barranco | 10 | 2.5 |
| Total | 396 | 100 |

Fuente: Rodas (2005). *Asentamientos precarios en la ciudad de Guatemala. Problemáticas y pautas de actuación.*

En la tabla IV se representa en porcentaje del número de asentamientos precarios que se extienden en la zona urbana de la ciudad de Guatemala. El estudio de (Rodas, 2005), estudia de manera integral la evolución de este tipo de construcciones, los patrones de ocupación, las condiciones de riesgos y los desafíos que representan para las autoridades en el reordenamiento urbano. Enfatiza que una de las causas por las cuales habitan superficies de terreno a orillas de topografías accidentadas son los precios excesivamente altos de la tierra.

Figura 26. **Perfil de terreno ocupado en asentamientos, en la ciudad de Guatemala**



Fuente: Platas López, y otros (2016). *Vulnerabilidad y riesgo urbano, aportes desde la experiencia Guatemala y México.*

1.3.7. Ubicación

La ciudad de Guatemala se considera como la más grande metrópoli de Centroamérica. El ingeniero Rafael Aguilar Batres la dividió en zonas, como parte de su proyecto de ordenamiento territorial. La ciudad está dispuesta, según el orden neoclásico, en una retícula cuadrada que se va expandiendo en todas direcciones, (Palma Urrutia, 2009).

El valle de Guatemala presenta una geomorfología con franjas escarpadas y barrancos. Esto ha influido en el comportamiento inusual de la expansión urbana, rompiendo en la mayoría de las ocasiones la estructura reticular original. Los accidentes geográficos han determinado por qué la ciudad ha crecido hacia determinados lugares y no hacia otros (Valladares, 2011). Señala que la salida al Atlántico posee una pendiente poco inclinada, lo que ha facilitado la construcción de vías de comunicación y accesibilidad, hasta el final de la zona veinticinco, donde la urbanización se frena por la irregularidad topográfica.

En el año 1944 la urbe se desarrolla rápidamente cuando se derogó la Ley de la vagancia que impedía la migración hacia la ciudad, impulsada por el General Ubico. Cuando concluyó este período de gobierno se intensificó el éxodo hacia la capital en busca de nuevas fuentes de trabajo. Esto contribuyó al establecimiento de asentamientos precarios formados por poblaciones de los departamentos y municipios de Guatemala. Entre los más importantes resaltan La Ruedita, La Trinidad, El Esfuerzo, El Incienso, El Tuerto, El Administrador, La Limonada y La Esperanza (ASIES, 1994).

1.3.8. Geología local

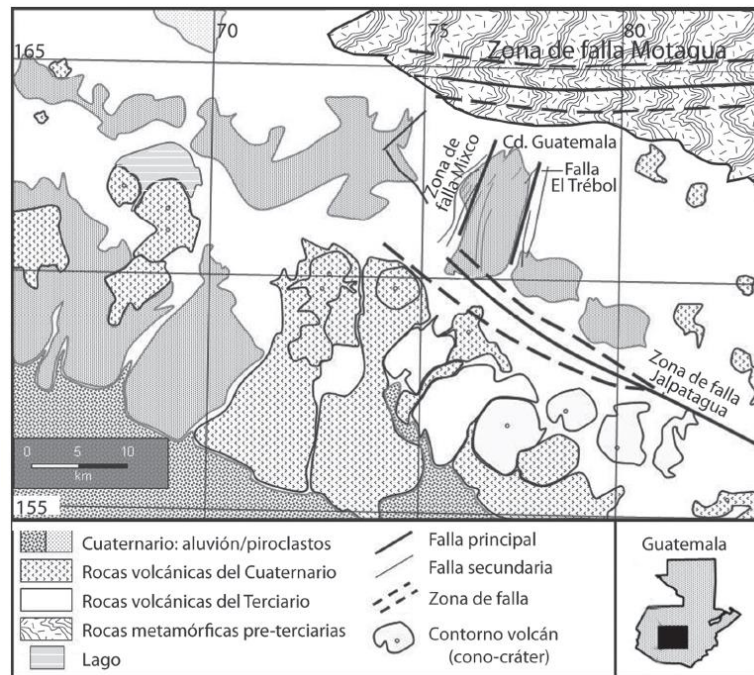
En las últimas investigaciones realizadas para evaluar la ciudad, en el artículo *“Estructura geológica del valle de la ciudad de Guatemala interpretada mediante un modelo de cuenca por distensión”* (Dengo, 1985), hace énfasis que se presenta otra estructura volcánica que no se correlaciona con el modelo de cuenca por distensión como un graben. Por ello, los datos evidencian la existencia de dos relictos volcánicos, cuya formación datan de la edad Terciaria que subyacen en los rellenos piroclastos. La formación volcánica cubre una región de la sierra de Chuacús y la actual cordillera del período Cuaternario de la cual no se cuenta con suficiente información geológica, esta será una de los primeros reconocimientos realizados por (Sapper, 1937), (Weyl, 1980), concluyendo que estos materiales han sido depositados, productos de fisuras durante las erupciones del Terciario, similar a lo ocurrido en Estados Unidos y México.

La escala de la cartografía disponible es de 1:250,000 (Bonis, 1969) donde sobresale la estructura geológica del Cuaternario que incluye los conos volcánicos. Estos evidencian la influencia de los productos lávicos y abanicos asociados a su estructura. En el vulcanismo Terciario se tienen amplias áreas donde su formación y los efectos poseen una escasa limitante para su interpretación geológica.

El modelo tectónico de Graben ha servido para que la estructura del valle de la ciudad se defina como una depresión originada por la tectónica de placas, delimitada por las fallas de Mixco y Pínula. Estas fallas se definen de tipo normal con un gran ángulo, se estima que son paralelas, con un rumbo de 20 km de longitud y con una orientación de norte a noreste. Su actividad provoca eventos

piroclastos que se han acumulado en el valle y cuya topografía que define el relieve entre los bloques y el graben es de 500 m.

Figura 27. **Geología para la interpretación de la estructura del valle de Guatemala (1:250,000)**

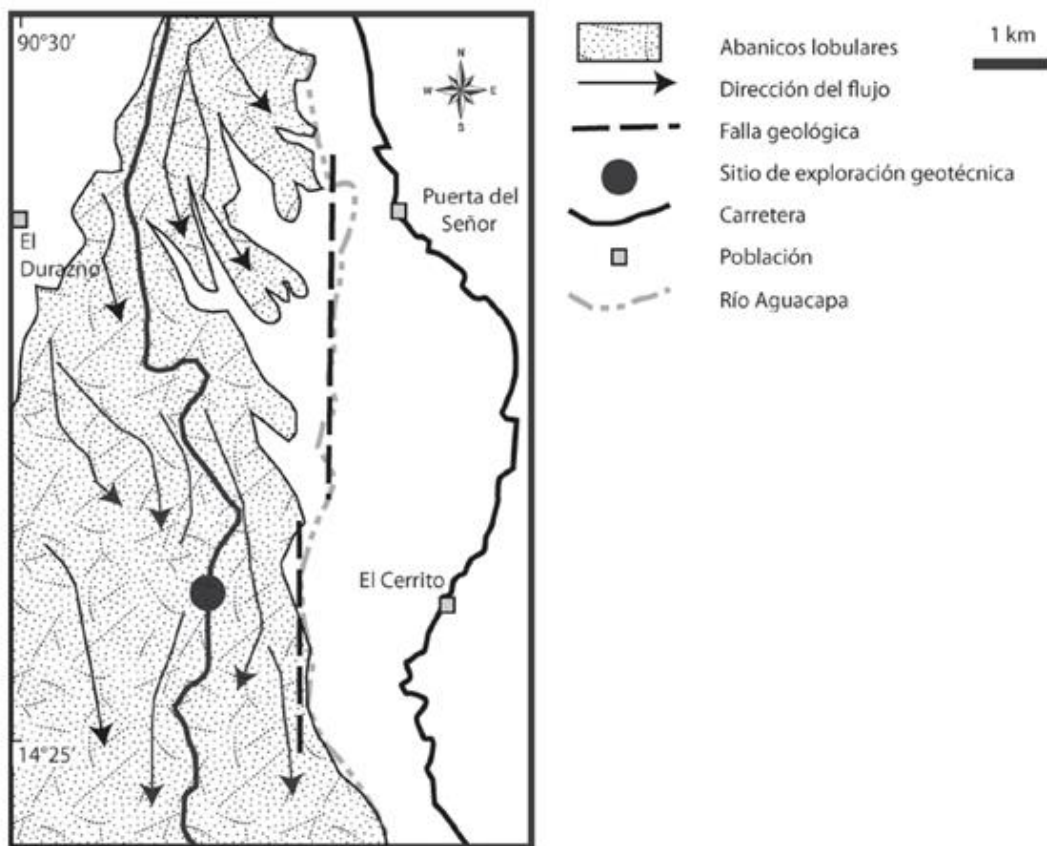


Fuente: Pérez (2009). *Estudio geotécnico para la planificación de la construcción de la planta para proceso de alimentos ACSA, San José Pinula, Guatemala.*

El modelo de Pull Apart Basin evidencia una formación geológico-geomorfológico (Pérez, 2009), en que se identifica la parte sureste del valle de Guatemala conformada por una sedimentación de compuestos finos depositados como flujos de lodos que llenaron los espacios de cañadas y las depresiones que se tienen en la actualidad. A esto se le denomina abanicos lobulares de Fraijanes. Esos suelos son limos-arcillosos, consolidados, con algunas partículas tamaño grava. La parte alta de la cuenca sobresale una antigua depresión que se

aproxima en forma circular, cuya formación inicialmente era una laguna, donde fue acumulándose por efectos de la naturaleza sedimentos y cuando ocurrió una falla en su estructura, este colapso en uno de sus bordes, lo que produjo una movilización de los sedimentos con mezcla de agua, formando un lodo; lo que representa la unidad de Abanicos Lobulares de Fraijanes.

Figura 28. **Interpretación geomorfológica del valle de Guatemala**
(1: 50,000)

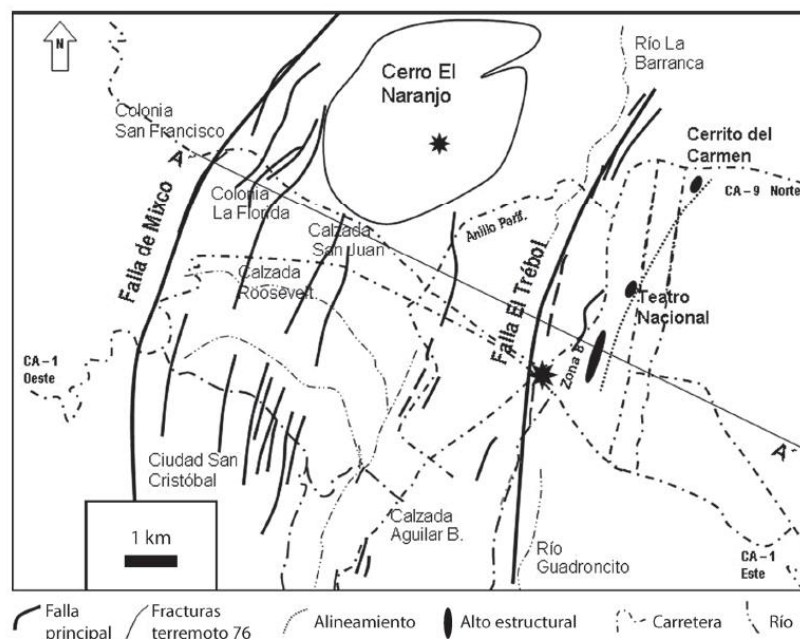


Fuente: Pérez (2009). *Estudio geotécnico para la planificación de la construcción de la planta para proceso de alimentos ACSA, San José Pinula, Guatemala.*

Durante muchos años se tuvo el misterio sobre la interpretación geomorfológica, en el que se reconocen formas concéntricas con el área de la laguna, donde se adentra en el valle de Guatemala y sus límites coinciden con el afloramiento de piroclastos correspondientes del período Terciario.

A partir del terremoto de 1976, investigadores identificaron varias fallas secundarias visibles vinculadas a la falla de Mixco. A partir de ellas elaboraron un mapa geológico a una escala 1: 250,000 donde las trazas al oeste del valle de Guatemala quedaron definidas. (Ver Figura 16) como Colonia La Florida y Ciudad San Cristóbal, siguiendo el alineamiento que coincide con la falla El Trébol, extendiéndose hacia el río La Barranca, finalmente se visualiza otra fractura con dirección al sur rumbo hacia el río Guadroncito.

Figura 29. **Esquema de fracturas elaborado a partir del terremoto de 1976 en el valle de Guatemala (1:250,000)**



Fuente: Pérez (2009). *Estudio geotécnico para la planificación de la construcción de la planta para proceso de alimentos ACSA, San José Pinula, Guatemala.*

Al igual, se presentan pequeñas fallas al norte y al sur que atraviesan toda la ciudad, pero por el crecimiento urbano y la necesidad de pavimentar para la circulación, no es posible determinar con precisión su recorrido, aunque en la actualidad se tienen registrados que las zonas más seguras son las partes planas, pero son de alto riesgo los centros poblados cercanos a barrancos y laderas (INSIVUMEH, 2012).

1.3.9. Barrancos identificados en el valle

El valle de la ciudad se define, principalmente, por estratos de cenizas, siendo sus peculiaridades geológicas que son fácilmente erosionables por agentes meteorológicos, en las cuales sus características propias, están definidas por barrancos surcados principalmente por el agua de lluvia, por lo cual se han construido puentes para la interconexión, como el de El Incienso cuyo fondo original del Graben, es rocoso e irregular, en que apenas se vislumbra; esto también sucede con el promontorio de Teatro Nacional, el Cerrito del Carmen y El Cerro del Naranja, cuyos flancos están recubiertos de escasas cenizas, por lo tanto el basamento rocoso del Graben es visible al ascender por la vías de San Lucas al occidente y por Don Justo al oriente.

Las cenizas y arenas volcánicas en el valle están asentadas sobre una superficie irregular, cuyos espesores varía de 100 – 200 m, en el que algunos casos se han identificado hasta 250 m tal como en la zona 13 y 14 de la ciudad capital (Deguate, 2017).

Figura 30. **Morfología del valle de la ciudad de Guatemala**



Fuente: Monzón (1991). *El valle de Guatemala, una maravilla geológica.*

1.3.10. Unidades hidrogeológicas

Las distintas formaciones litológicas en la región de la ciudad de Guatemala pueden ser clasificadas a fin de identificar sus peculiaridades relacionadas con el régimen del flujo, derivado su estructura geológica en su medio subterráneo, como también de esas características de continuidad y carga hidráulica. Dentro de su clasificación los parámetros más significativos son: a) granular con porosidad de intersticios y b) medio fracturado. El comportamiento en la primera unidad, el flujo se clasifica como lento y un régimen de tipo laminar; mientras que, en el medio con fracturas, los flujos son rápidos catalogándose como turbulentos.

En la región del valle se pueden distinguir las siguientes unidades hidrogeológicas:

1.3.11. Depósitos volcánicos cuaternarios

Su origen es de tipo piroclástico, mezclado con flujos de cenizas, con diferentes grados de consolidación, excediéndose en estratos mayor a 200 m, en el que sus límites más externos están compuestos por coladas de lava y toba, con distintas composiciones mineralógicas; en donde su geomorfología en la base al igual en sus laterales, establece la geometría del relleno.

La estructura tectónica de los bloques y hundidos, iniciados según por el rango de compactación que se dieron en las cenizas, son fundamentales para identificar el piso del relleno; así como, las fallas activas o latentes en el depósito, se localiza este tipo de barreras internas, dado a su ordenamiento estratigráfico.

1.3.12. Sedimentos fluvial - lacustres

En el período cuaternario los flujos y cenizas, se localizan dispersos en una extensa zona, principalmente al sur que define la divisoria continental, donde los sedimentos fluviales de gran importancia, cuyos afloramientos son estratos que pueden llegar hasta 30 m, mezclándose lo fluvial con lo lacustre, siendo este último el parámetro que puede precisar los límites de permeabilidad y el régimen causado por la meteorización como también la erosión, en algunos casos iniciados por las corrientes fluviales.

Para una clasificación más precisa de los aluviones, cuya orogénesis y diagénesis sean recientes, las unidades hidrogeológicas han condicionado esos

elementos de relleno de dimensiones variadas de la siguiente manera: grandes bloques, rocas, gravas y arenas de basaltos, andesitas, arcillas, limos de pómez, entre otros.

La tabla se engloba los aluviones que tienen mayor relevancia para los estudios geotécnicos y su ubicación dentro del perímetro de la ciudad.

Tabla V. **Características y espesores de la ciudad de Guatemala**

| Valle aluvial | Profundidad máxima (m) | Amplitud máxima del cauce (m) | Superficie (km²) |
|---|-------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| Villa Lobos | | | |
| Pínula | 40 – 80 | 100 – 1,500 | 16 |
| Las Minas | | | |
| Delta del Villalobos en el Lago de Amatitlán | 100 | Radio estimado de 2,500 | 17 |
| Valle Aluvial del Michatoya | 60 – 80 | 100 – 1,000 | 24 |

Fuente: INSIVUMEH, IGN, ONU (1978). *Proyecto: Estudio de aguas subterráneas en Guatemala.*

1.3.13. Lavas volcánicas del terciario

Forman una gran cubierta sobre los depósitos cretácicos, lavas de distintas composiciones mineralógicas, en el que rocas ígneas de tipo extrusivo se enfriaron rápidamente y el movimiento continuo de la tectónica de placas

después del derrame, indujeron una fracturación de los planos sometidos a esfuerzos críticos (INSIVUMEH, IGN, ONU, 1978), en los estudios realizados sobre el valle de Guatemala, se identifican fracturas con mayor frecuencia en planos de 30° a 45° como extremos en el plano vertical y horizontal. Esta fracturación forma espacios reticulares de diversa geometría (afloramientos de lava andesíticas en el borde del lago de Amatitlán); por otro lado, ha ayudado a observar espacios de alteración inducidos como efecto secundario de las grandes fallas.

1.3.14. Calizas del cretácico

Circunscrita únicamente al norte de la ciudad, teniéndose como referencia el río de Las Vacas, su importancia es imperceptible; debido a que zonas de yacimiento superficial y subsuperficial están limitadas, en donde se encuentra a mayor profundidad, las exploraciones como perforaciones realizadas en esta región, indican un intenso fracturamiento traducido que hidrológicamente tiene cierto interés, para esos proyectos para aprovechamiento de agua a través de pozos.

1.3.15. Clima

Las características que dan origen a los fenómenos climatológicos en la ciudad de Guatemala se deben a distintas variables, por ejemplo, la circulación general de la atmósfera, influencia oceánica; adquiriendo ciertas características especiales dado a la topografía irregular y la latitud. Las estaciones que se denotan en el hemisferio norte (primavera, verano, otoño e invierno); no corresponde a Guatemala esta peculiaridad; siendo estas en los meses de mayo a octubre, como época de invierno y de noviembre a abril, época seca.

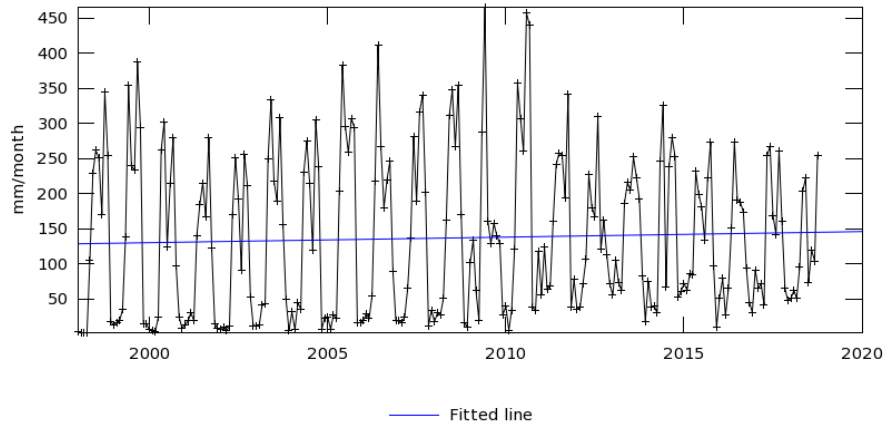
El ciclo lluvioso se establece en la región por los vientos Alisios del Noreste y los que se aproximan de la zona de convergencia intertropical, desprendiendo un conjunto de nubes desde la costa africana, a lo que son llevados por esos vientos alisos, adquiriendo mayor energía en el este, lo que genera la precipitación; sin embargo, en algunos casos pueden producirse ciclones tropicales, aumentando esa cantidad de lluvia durante su recorrido. En cambio, la época seca se origina por el aumento de la presión atmosférica, la migración de las masas de frío (proveniente de los hemisferios polares conocidos como frentes fríos) propician que la temperatura disminuya y se incremente la velocidad de los vientos predominantemente del norte.

1.3.16. Precipitación

La humedad atmosférica precipita dentro de las cuencas del valle de Guatemala, principalmente como lluvia, pero adicional se presentan otros fenómenos meteorológicos, tal es el caso del rocío, granizo y otro tipo de precipitaciones cuya importancia cuantitativa no ha podido determinarse. Por las características de altitud y geomorfológicas pueden generarse como orográficas o convectivas, la primera en la parte baja del valle, mientras que la segunda, en la cabecera de las cuencas.

Figura 31. Precipitación promedio mensual área de influencia

Time Series, Area-Averaged of Precipitation Rate monthly 0.25 deg. [TRMM TRMM_3B43 v7] mm/month over 1998-Jan - 2018-Oct, Region 90.7498W, 14.4937N, 90.2884W, 14.7464N

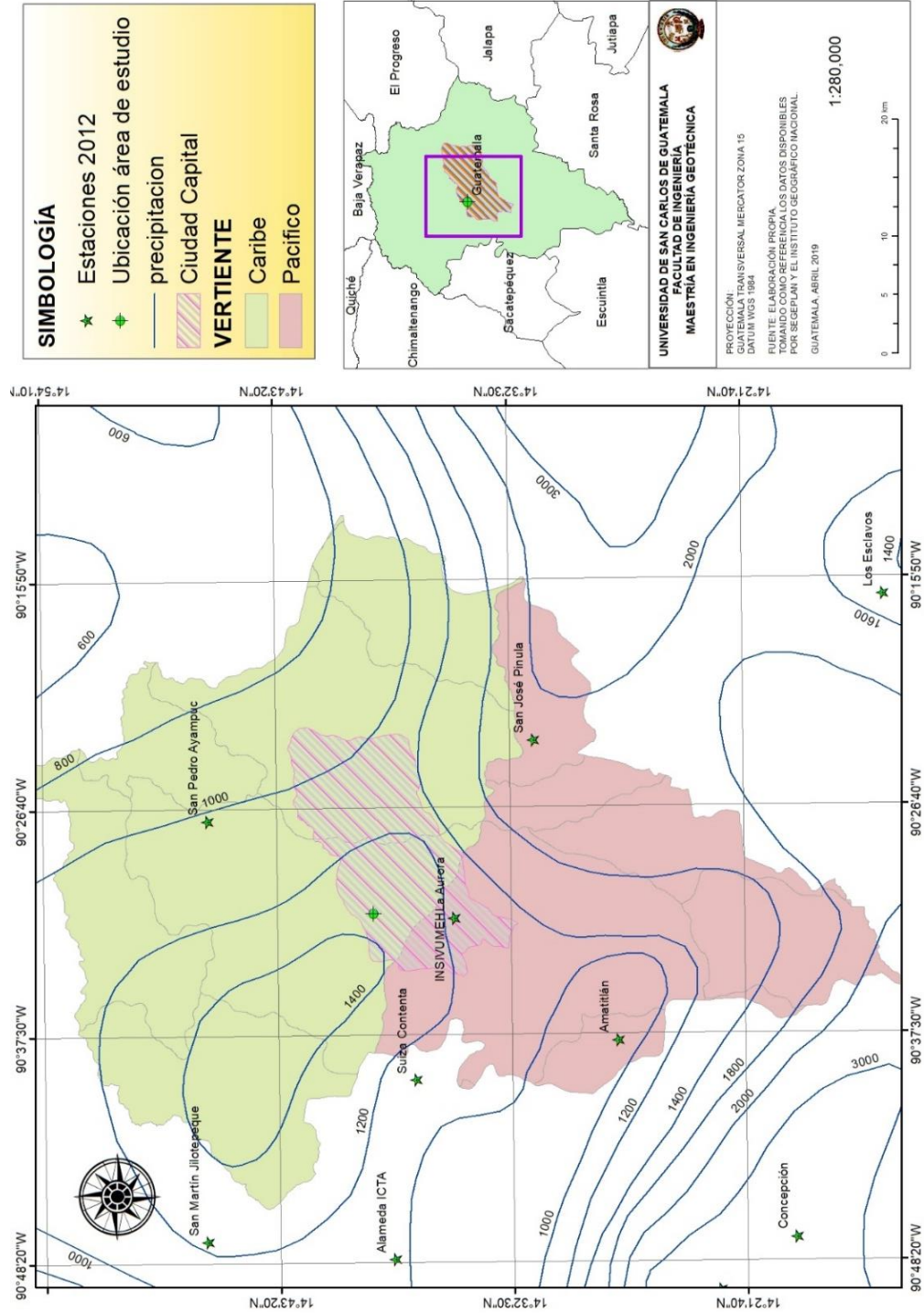


- The user-selected region was defined by 90.7498W, 14.4937N, 90.2884W, 14.7464N. The data grid also limits the analyzable region to the following bounding points: 90.625W, 14.625N, 90.375W, 14.625N. This analyzable region indicates the spatial limits of the subsetted granules that went into making this visualization result.

Fuente: NASA (2019). *Sensor remoto GIOVANNI*.

En la Figura 31, se observa la cantidad de precipitación promedio mensual, empleando como herramientas el sensor remoto Giovanni, que es una alternativa para correlacionar con los datos generados por instituciones encargadas a monitorear los registros pluviométricos ante los eventos de inundaciones y catástrofes. Se observa que se tienen acontecimientos de tormentas máximas entre los periodos del 2005 al 2010, en que se atribuyen a los fenómenos meteorológicos y atmosféricos, como el Stan, Tormenta 16 y la tormenta Agatha, que está última es una de las más empleadas para generar modelos hidrológicos que se han presentado cronológicamente para nuestro país.

Figura 32. Mapa de isoyetas del valle de la ciudad de Guatemala



Fuente: elaboración propia.

1.3.17. Características de la cuenca del río Motagua

El río Las Vacas se ubica en la cuenca al norte de la ciudad, desboca en la vertiente del Atlántico, recoge como afluentes en la rivera izquierda los ríos: Chinautla, Tzajlá y El Zapote; en el que muchas de las corrientes son de mayor profundidad y desde su parte media en dirección aguas abajo, su área de drenaje posee una habitual cubierta vegetal.

Cerca de la colonia La Florida, surge el río Chinautla, también conocido como el río El Naranja, recibiendo aportes de la quebrada La Barranca; este inicia su tramo a la altura del Trébol (localizado en el cruce CA-1 y CA-9) y el Marrullero colindante del Hipódromo del Norte.

El río de Tzajlá, surge al igual de la colonia La Florida, este tiene aportes por los ríos Guacamayas y Salayá; estos afluentes en la actualidad se encuentran totalmente contaminados, esto por la expansión que se ha tenido de la metrópoli en esa zona, cuyas redes de alcantarillado sanitario, sus vertientes no cuentan con unidades de depuración.

Al borde del occidente de la ciudad, específicamente en la cuenca norte, inicia el río Zapote, a la altura de San Pedro Sacatepéquez, se alimenta de las quebradas Yumar, Las Limas y El Milagro. Antes de descargar en el río Las Vacas, se añade el río Las Flores. En el año 1977 se contó con el registro que las aguas de estas corrientes, mismas que sus características fisicoquímicas evidencia que se encuentran bastante limpias, dado que no existen sitios poblados cercanos.

2. METODOLOGÍA PARA ANÁLISIS DEL CAMBIO Y USO DE SUELOS, EMPLEANDO IMÁGENES SATELITALES

Una imagen digital obtenida a partir de sensores remotos, descargada en instituciones dedicadas al estudio constante de la corteza terrestre se designa como imagen en bruto, es decir, en su base de datos sus valores numéricos nombrados también como niveles digitales, se derivan de la firma espectral que posee cada cuerpo y se describe mediante una ecuación lineal. La radiancia que capta el sensor no necesariamente tiene origen en el suelo. Es, en cambio, el resultado de una reducción de la absorción atmosférica y, por otra parte, la que se incrementa por la propia atmósfera, se denomina dispersión.

El procesamiento y la metodología para evaluar las imágenes a partir de sensores remotos se basa en la versión gratuita, desarrollada por *Harris Geospatial*. Los profesionales en teledetección y analistas de imágenes lo utilizan para tomar las mejores decisiones. Se puede utilizar en dispositivos de escritorio o móviles. Con ello, cumple con la caracterización de las áreas susceptibles a deslizamientos, por medio de un análisis de cambio de uso de suelo.

2.1. Clasificación imagen satelital

La clasificación de una imagen obtenida a partir de sensores remotos implica hacer su categorización a través del manejo de las bandas; en términos de estadística, implica hacer esa reducción de píxeles para una escala de medida; es decir, es asignar valores a la imagen ráster, asignándole una clase.

Tabla VI. **Clasificación de píxeles de una imagen digital**

| Clasificación imagen digital | |
|-------------------------------------|----------------|
| Bosque y vegetación | Zona urbana |
| Suelo | Cuerpo de agua |
| Nubes | Sin clasificar |

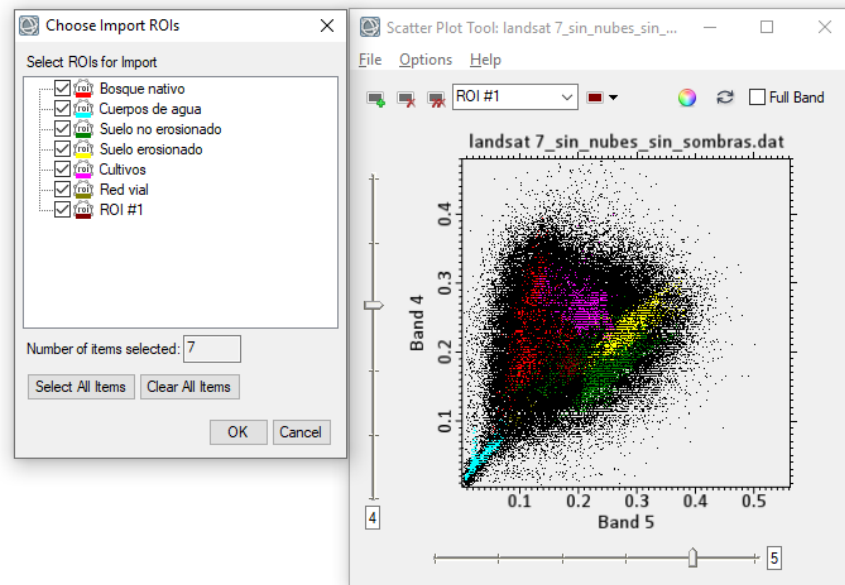
Fuente: elaboración propia.

Para clasificar la imagen Landsat se debe contar con la imagen de reflectancia corregida, sin nubes. Esto reduce los errores durante su categorización a través de los píxeles. Cuando se crean las clases se debe respetar la simbología de la tabla IV. La cobertura de bandas permite resaltar las distintas texturas y variaciones de la corteza terrestre, haciendo la combinación de bandas 5,4,3 (RGB)¹ en que se visualiza la vegetación en distintos tonos de verde, aplicando la herramienta *Region of Interest (ROI)*.

En la firma espectral haciendo referencia a la imagen de la radiancia, con la herramienta *Scatter Plot Tool*, se carga los ítems de categorización, obtenido con *ROI*, para validar la categorización realizada.

¹ RGB= red, green, blue

Figura 34. Reflectancia para una clasificación supervisada

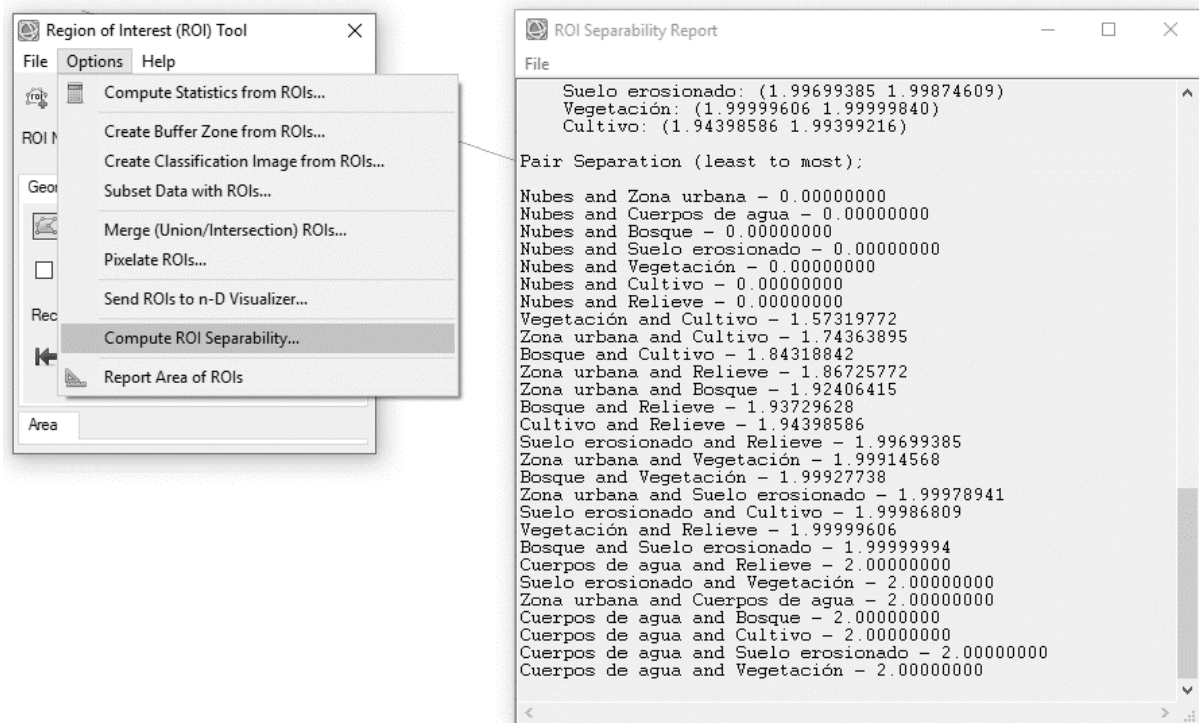


Fuente: Harris Geospatial (2015). *Modelamiento para imágenes digitales a partir de sensores remotos*.

2.1.1. Verificación de la separabilidad espectral

La definición de clases, en el área de estudio, servirá para determinar y aprobar la separabilidad espectral, en ella se delimitará y validará si se ha procesado correctamente las muestras tomadas de la imagen digital. Al seleccionar la herramienta *Region of Interest (ROI)*, se elige la opción *compute ROI separability*, en el que se desplegará valores en un rango de 1 a 2; cuando los resultados sean menores a 1.8 se interpretará que el software para su modelamiento, las clases deberán unirse, con ello se disminuirá el margen de error para una clasificación supervisada.

Figura 35. Separabilidad espectral en imágenes obtenidas por medio de sensores remotos

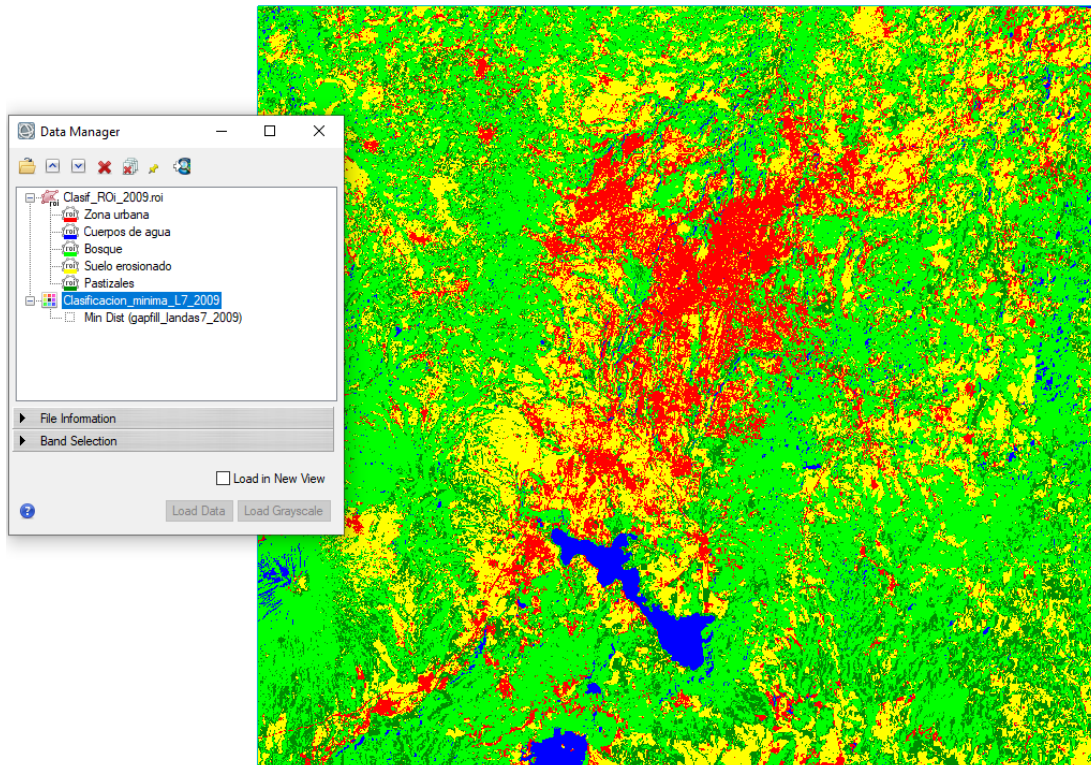


Fuente: Harris Geospatial (2015). *Modelamiento para imágenes digitales a partir de sensores remotos*.

2.1.2. Clasificación distancia mínima

Definidas las clases y la firma espectral de las muestras seleccionadas, se emplea la herramienta *Classification > Supervised Classification > Minimum Distance Classification*, se elige la imagen de reflectancia y posterior las muestras que se han identificado en la imagen digital. Dado a que no se conoce el umbral de probabilidad, se optará ninguno, con un factor de escala igual a uno, dado que la línea base de la imagen digital son reflectancia.

Figura 36. **Imagen digital empleando metodología distancia mínima para su clasificación**



Fuente: Harris Geospatial (2015). *Modelamiento para imágenes digitales a partir de sensores remotos.*

2.1.3. Posclasificación de una imagen digital con la matriz de confusión

Con los resultados obtenidos para una clasificación de imágenes digitales a partir de un satélite, se hace necesario una posclasificación, la cual permitirá identificar aquellos píxeles que no se categorizaron correctamente según el método elegido, ya que generalmente se tienen algunos valores aislados, a lo que será fundamental agrupar.

Para la verificación de una categorización, se emplea una matriz de confusión que permitirá importar los valores *ROI*, que son las clases elegidas en la imagen satelital; con la herramienta *Post Classification > Confusion Matrix Using Ground Truth ROIS*, con ello se interpretará si esos valores están procesados correctamente, siendo la línea base la imagen de reflectancias.

Se adquiere un total de 34236 píxeles, que se clasificaron de un total de 35961 que contiene la imagen, con un resultado en calidad de datos de 95.20 %, esto se deriva de la cantidad de clases elegidas.

Tabla VII. **Matriz de confusión posclasificación**

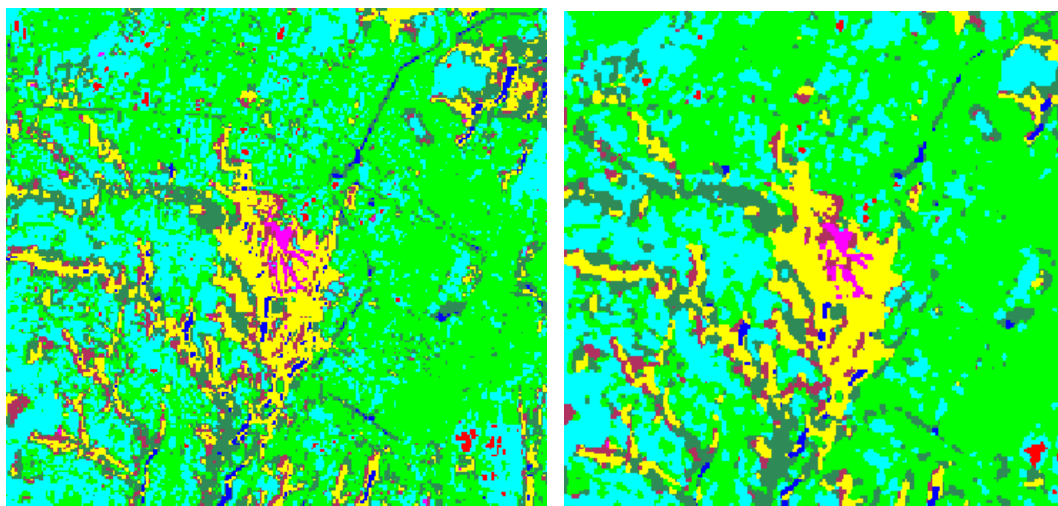
| Precisión total del área en píxeles = (34236/35961) 95.2031 % | | | | | |
|--|-------------------------------------|--------------------|----------------------------|------------------------|--------------|
| Coefficiente Kappa = 0.9301 | | | | | |
| Class | Valores verdaderos (Píxeles) | | | | |
| | Nubes | Zona Urbana | Bosque y vegetación | Cuerpos de agua | Suelo |
| Sin clasificar | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Nubes | 582 | 7 | 0 | 0 | 0 |
| Zona urbana | 12 | 8330 | 190 | 0 | 0 |
| Bosques y vegetación | 0 | 1275 | 14062 | 0 | 0 |
| Cuerpos de agua | 0 | 0 | 0 | 10100 | 0 |
| Suelo | 48 | 193 | 0 | 0 | 1162 |
| Total | 642 | 9805 | 14252 | 10100 | 1162 |

Fuente: Harris Geospatial (2015). *Modelamiento para imágenes digitales a partir de sensores remotos.*

2.1.4. Filtrado de mayoría

Con la calidad de datos que presentan los píxeles, se define el filtrado por mayoría, en que se elegirá los *ROI*, que corresponde a las clases que se han identificado para el área de estudio. Este procedimiento se filtra la imagen clasificada, en que se corrige esas imperfecciones que no se obtuvo un procesamiento por la resolución del sensor remoto.

Figura 37. Imagen clasificada (derecha) y filtrado por mayoría (derecha)



Fuente: Harris Geospatial (2015). *Modelamiento para imágenes digitales a partir de sensores remotos.*

2.1.5. Procesamiento de imágenes satelitales

Cuando se principia a modelar las imágenes tipo ráster, uno de los softwares especializados en su procesamiento, es el desarrollado por *Harris Geospatial*, vinculado a ser una herramienta complementaria para ArcGIS de Esri. Por los flujos de trabajo que integra ENVI en una interfaz sencilla, es que soporta

imágenes de tipo satelital y los sensores aerotransportados, incluyendo: pancromático, multiespectrales, radar, lidar, entre otros.

Los datos que emplea ENVI, radica en un archivo binario plano y un pequeño fichero ASCII de cabecera asociado, para la correlación de cualquier tipo de imagen aeroespacial. Este tipo de información parametriza las dimensiones y otros datos pertinentes, para desplegar conjuntos de datos, permitiendo su representación de manera visual (SIGSA, 2019).

2.1.6. Corrección atmosférica

El área de influencia caracterizada principalmente por las condiciones atmosféricas y la firma espectral en la zona de estudio para su evaluación se presenta dos tipos de energía (energía reflejada e incidente), la reflectividad de los cuerpos sobre la corteza terrestre no afecta los resultados y cálculos de la reflectividad, ya que el espesor de la atmósfera es distinto. En cambio, debe considerarse que la radiancia que recibe el satélite no es la misma que es emitida por el suelo, que es lo que interesa en los análisis de imágenes digitales a partir de sensores remotos, siendo necesario medir la reflectividad de la superficie y no la influida por la atmósfera (Sitjar y Busquets, 2019).

2.1.7. Emisividad de la superficie terrestre

Los valores de emisividad cuando se estima la firma espectral emitida por superficie de la tierra, es fundamental en el concepto de emitancia, donde se entiende como la energía radiada en todas las direcciones para una unidad de superficie y espacio en el tiempo, cuya unidad de medida es el vatio por metro cuadrado. La emisividad en cambio es la relación de la emitancia de una

superficie y la de un emisor perfecto, denominado como cuerpo negro a una misma temperatura.

El conocimiento de la temperatura es la que resulta de interés a los especialistas en manejo de imágenes digitales, para comprender la interacción superficie/atmósfera, resultando este análisis para los balances de agua y energía, evapotranspiración, entre otros, siendo necesario hacer las correcciones de los efectos atmosféricos y el efecto de la emisividad.

2.1.8. Eliminación de bandeo, reflectancia y nubes, para el sensor remoto Landsat 7

Las imágenes satelitales están influenciadas por una serie de interferencias que hacen que aparezca plasmada errores, como lo son: la reflectancia, el bandeo y los mecanismos de captación del sensor, obteniendo con ello una imagen con una distorsión global.

2.1.9. Corrección bandeo de imágenes Landast

Para la medición de las distintas firmas espectrales de los cuerpos, mediante modelos matemáticos a partir del software ENVI, como primera instancia es la corrección de las imágenes Landsat, ya que es uno de los puntos fundamentales de los problemas asociados a la ausencia de datos, que es representado por bandeo o franjas paralelas entre sí, lo que se corrige con el complemento Landsat gapfill.sav, asignándole un valor a ese píxel faltante.

Figura 38. **Imagen Landsat 7 ciudad de Guatemala**

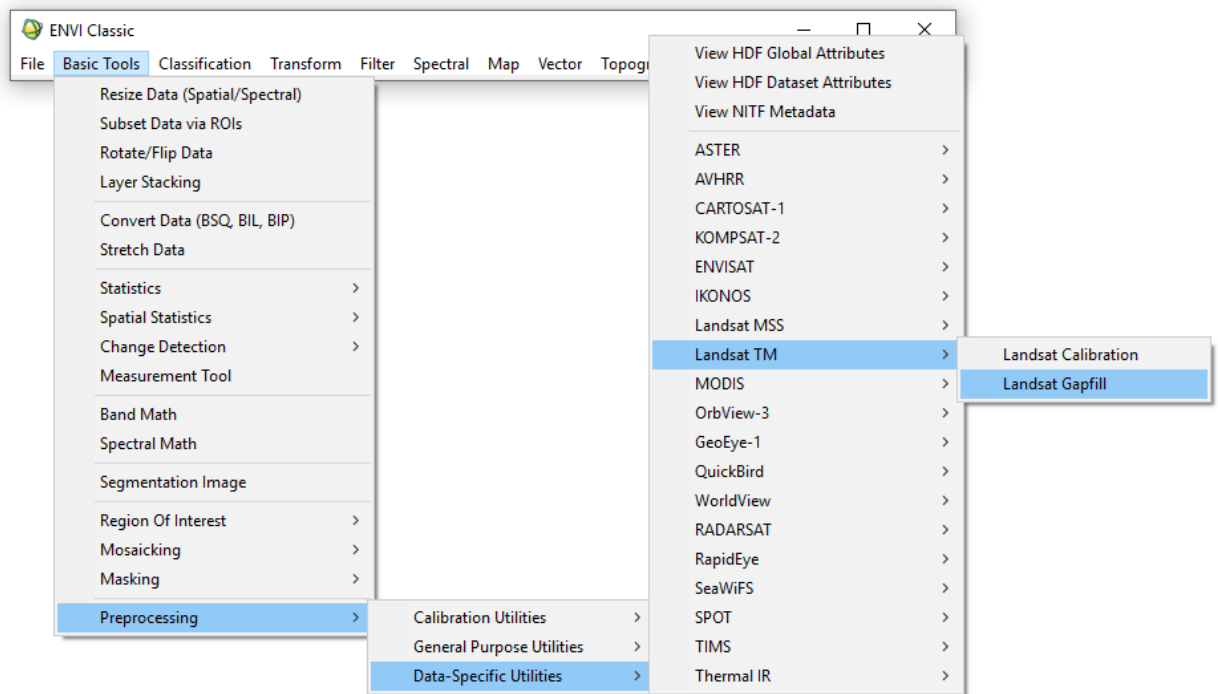


Fuente: USGS (2009). *Sensor remoto Landsat 7.*

2.1.10. Procesamiento para corrección de franjas negras

Cuando se cargan las imágenes Landsat en el software, es necesario eliminar las nubes y las franjas negras que resultan en la imagen. Como se describió anteriormente, esto interfiere en los resultados del procesamiento de la firma espectral, debido a que los píxeles en esos puntos no tienen valores. Para ello se trabajará con la herramienta *basic tolos*, en la opción de *Preprocessing >data specific utilities > Landsat TM > Landsat gapfill*.

Figura 39. Eliminación de franjas negras de imagen digital

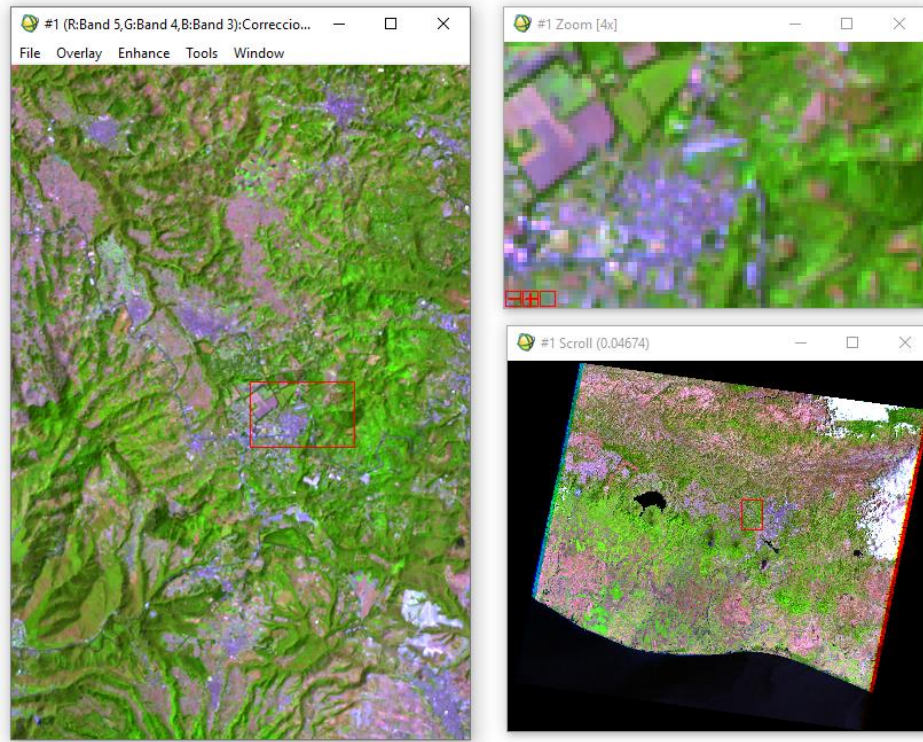


Fuente: Harris Geospatial (2015). *Modelamiento para imágenes digitales a partir de sensores remotos*.

Elegida la opción para eliminar el bandeo, se opta por la primera alternativa *single file gap fill*, en el que tomará los valores cercanos de las franjas negras y le asignará un valor próximo al píxel, mediante una extrapolación para eliminar esos errores que se tienen en la escena para su respectivo análisis.

El contenedor generado, es una imagen que domina todas las bandas corregidas en un mismo proceso, que es una ventaja sustancial para programas especializados en el modelamiento de imágenes de tipo ráster. Debe considerarse que esta metodología es empleada únicamente para imágenes derivadas del sensor remoto Landsat.

Figura 40. **Eliminación de franjas negras en una imagen digital**

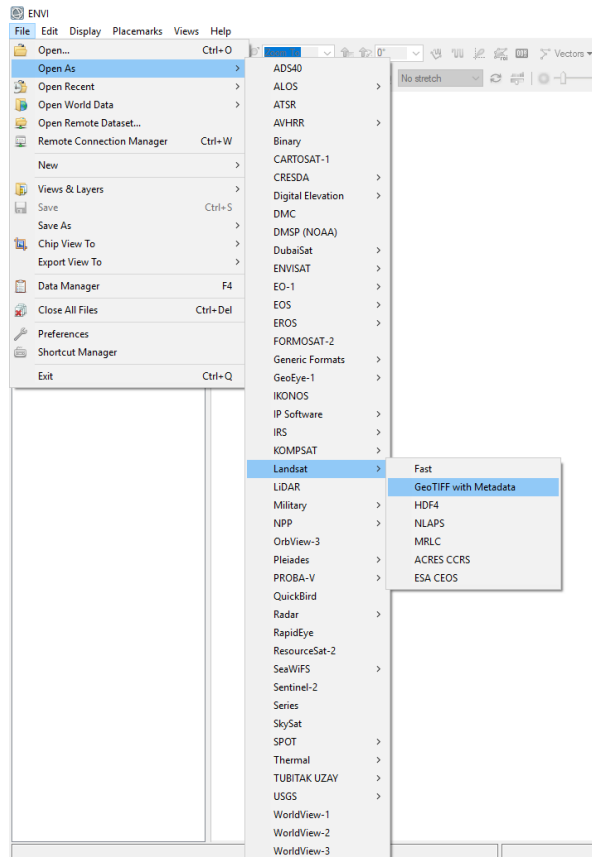


Fuente: Harris Geospatial (2015). *Modelamiento para imágenes digitales a partir de sensores remotos.*

2.1.11. Calibración de imágenes digitales Landsat para un análisis multitemporal

Iniciando con la aplicación de ENVI, para el modelamiento del análisis multitemporal, los archivos a recurrir serán de extensión TIFF, para conocer la información de las características de una imagen digital, las opciones dentro de la caja de herramientas del software. Se deberá elegir que pertenece a un sensor remoto a partir del Landsat; para la zona de estudio se tomaron como línea base el año 2009 hasta el año 2019.

Figura 41. **Identificación de los atributos de la imagen digital**



Fuente: Harris Geospatial (2015). *Modelamiento para imágenes digitales a partir de sensores remotos.*

Dentro de los lineamientos para un procesamiento de una imagen digital, se debe contar con el tipo de proyección, fecha en que se capturó la imagen, hora de vuelo, el tamaño del píxel y el número de bandas.

A continuación, se detalla las características más importantes de las imágenes que se hará la modelación de la cobertura y el cambio de uso de suelo, que ha sufrido en un período de diez años.

Tabla VIII. **Atributos de la imagen digital de los sensores Landsat**

| | | Tipo de imagen | | | | |
|--------------------|------------|-----------------------|------------|------------|-----------|--|
| Descripción | | Landsat 7 | | | | |
| Sensor | | Landsat ETM+ | | | | |
| Bandas | | 6 | | | | |
| Tipo de archivo | | TIFF | | | | |
| Proyección | | UTM zona 15 N | | | | |
| Datum | | WGS 1984 | | | | |
| Píxel | | 30 m | | | | |
| Fecha | 3/04/2009 | 10/05/2010 | 1/05/2011 | 3/28/2012 | 2/11/2013 | |
| Hora de escena | 16:14:11 | 16:16:15 | 16:17:20 | 16:18:14 | 16:20:19 | |
| | | Landsat 8 | | | | |
| Sensor | | Landsat OLI | | | | |
| Bandas | | 7 | | | | |
| Tipo de archivo | | TIFF | | | | |
| Proyección | | UTM zona 15 N | | | | |
| Datum | | WGS 1984 | | | | |
| Píxel | | 30 m | | | | |
| Fecha | 28/10/2014 | 17/02/2015 | 23/03/2016 | 15/12/2017 | 5/03/2018 | |
| Hora de escena | 16:22:13 | 16:22:51 | 16:26:15 | 16:24:17 | 16:23:47 | |

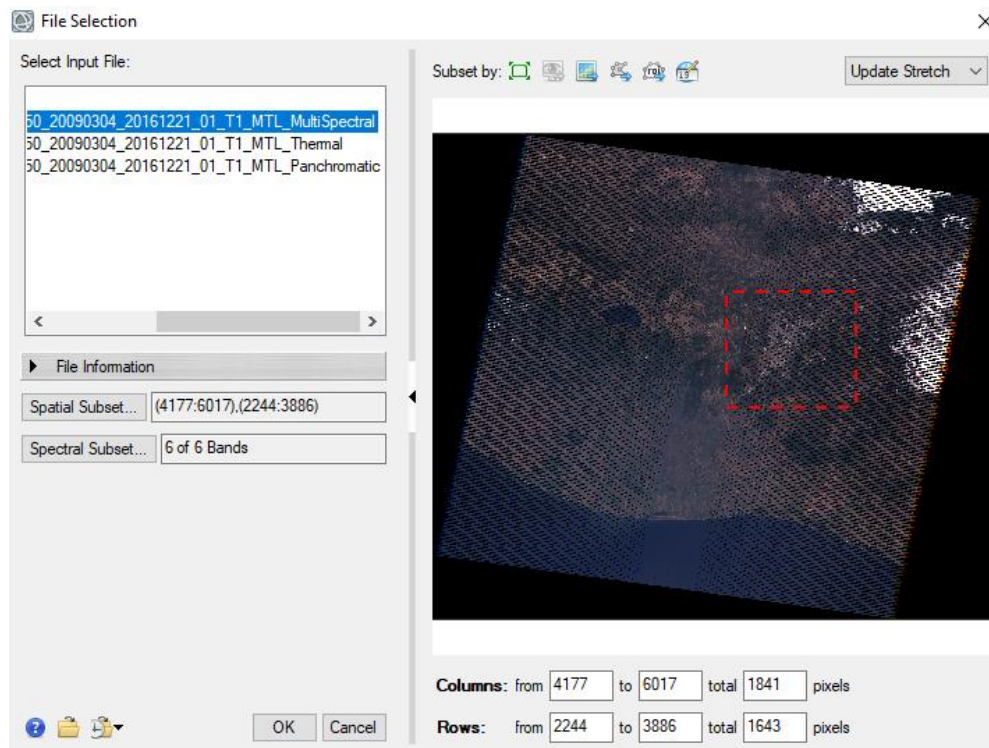
Fuente: U.S. Geological Survey (2019). *LANDSAT USGS*.

2.1.12. Procesamiento para corrección de la reflectancia

Al iniciar un procesamiento para las evaluaciones de las imágenes digitales y la extrapolación de las bandas ya definidas, debe contemplarse una corrección radiométrica, la cual es una herramienta que viene añadida en el software ENVI en su versión 5.3 eligiéndose la opción *radiometric calibration*, optando por la opción de la imagen con descripción de multiespectral.

No es necesario emplear toda la imagen digital para el análisis del área de estudio; para enmarcar la zona de interés, se elige la opción *spatial subset*, este aparecerá en un rectángulo color rojo punteado.

Figura 42. Selección de una imagen multiespectral para su calibración

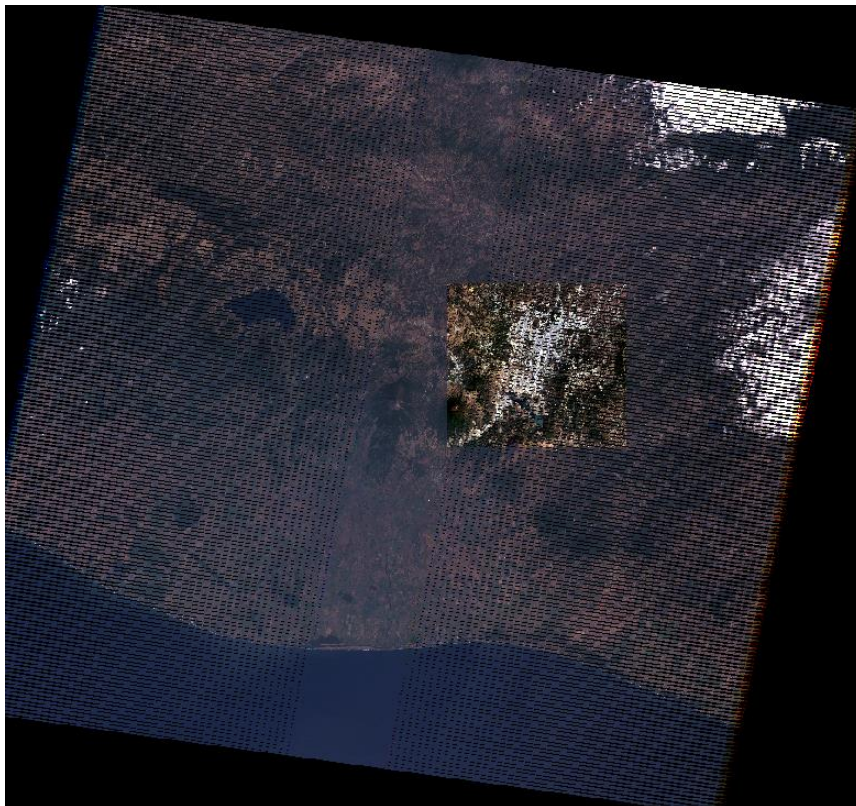


Fuente: Harris Geospatial (2015). *Modelamiento para imágenes digitales a partir de sensores remotos*.

Para este tipo de estudios, la opción que se debe ajustar es la radiancia, teniendo un factor de escala de 0.10 que se obtiene al señalar la casilla de apply flash settings, el valor asignado permite corregir las variaciones atmosféricas, generadas principalmente por las nubes, que impide la visualización del caso de estudio. Estos errores causados por vapor de agua y corrientes de aire, impide

que los píxeles tengan una valoración, siendo así, que se manipule y se aislé esos elementos dentro de la escena para una correcta interpretación.

Figura 43. **Parametrización del caso de estudio Puente El Incienso, empleando una imagen Landsat**



Fuente: Harris Geospatial (2015). *Modelamiento para imágenes digitales a partir de sensores remotos.*

Elegida el área de influencia para el caso de estudio, se selecciona *atmospheric correction module > flaash atmospheric correction*, permitiendo el manejo de la reflectancia y corregir errores naturales por efectos naturales, para este es caso un factor de escala de 1, esto se debe a que en el paso anterior se tiene estimada esa conversión de unidades. Es muy importante que se tenga al

alcance la información de la imagen satelital, según lo indicado en la tabla VI para completar los atributos que fueron asignados del sensor remoto.

Cuando se añade la imagen, debe notarse que ya están cargadas automáticamente las coordenadas de la zona seleccionada, siendo su proyección UTM zona 15 N, en las opciones del tipo de sensor, deberá seleccionarse que es un análisis multiespectral a partir de una imagen Landsat.

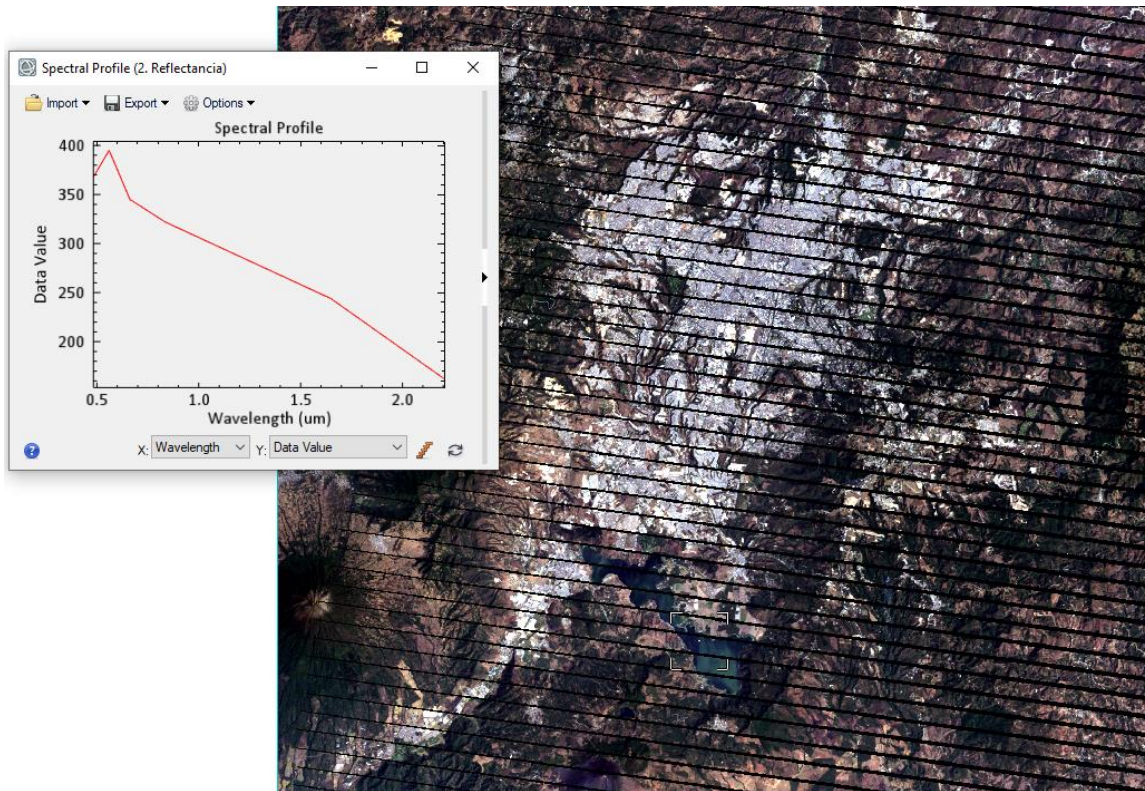
Para la visibilidad de las nubes en la opción *initial visibility*, su valor máximo es de 40 que se traduce que la imagen está libre de nubes, pero por los efectos del vapor de agua, puede estimarse a un valor de 35. Posteriormente, se debe adoptar la configuración *multispectral settings*, la cual permitirá asignar las bandas correctas a procesar dentro del análisis, para este caso corresponde una evaluación por el método de Kaufman – Tanre Aerosol Retrieval, con una longitud de onda de 660: 2100 nm.

Figura 44. Configuración para la corrección atmosférica del modelo digital con la herramienta *flaash*

Fuente: Harris Geospatial (2015). *Modelamiento para imágenes digitales a partir de sensores remotos.*

Haciendo la corrección mediante la herramienta *flaash*, se carga la escena de reflectancia, cuya combinación de bandas se tiene como resultado la firma espectral de los cuerpos sobre la superficie terrestre, para el caso de estudio se considera que es una zona urbana. Al posicionarse en diferentes puntos de la imagen, se notará que los valores oscilan en un rango de 0 a 10,000 pero también se existen valores negativos, que representan sombras o bien el modelo matemático del software no puede resolver, por lo que deberá parametrizarse el perfil espectral.

Figura 45. Firma espectral en una imagen digital



Fuente: Harris Geospatial (2015). *Modelamiento para imágenes digitales a partir de sensores remotos.*

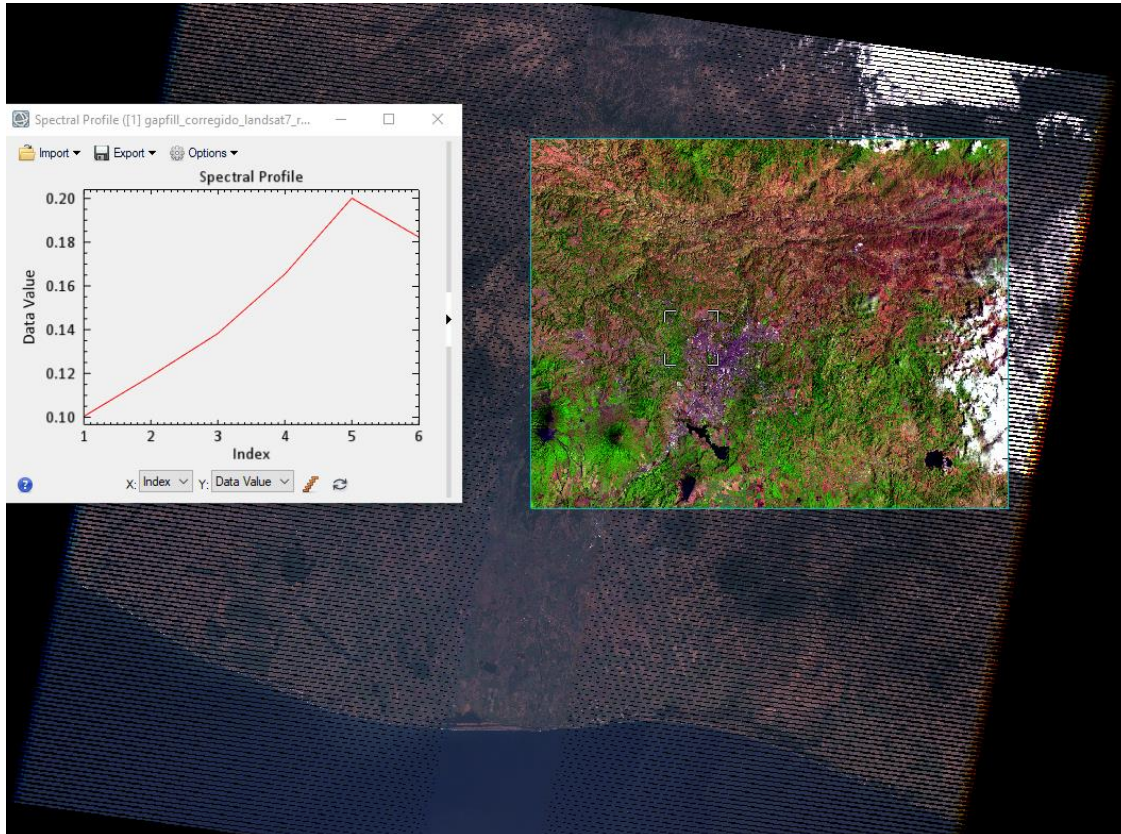
Para los análisis biofísicos, los valores de la firma espectral deben estar contenidos en un rango de 0 a 1, a continuación, se detalla el uso de *band math*, con ello, permitirá tener resultados de reflectancia en una frontera definida.

$$(b1 \leq 0) * 0 + (b1 \geq 10000) * 1 + (b1 > 0 \text{ and } b1 < 10000) * \text{float}(b1)/10000$$

La expresión permitirá redefinir la firma espectral, donde el manejo de la banda uno, los resultados que sean menor o igual a cero, su nueva expresión será cero,

pero en cambio si la banda uno es mayor a diez mil, se redefinirá a un valor de uno (SIG ARTEAGA, 2016).

Figura 46. **Parametrización de valores de reflectancia**



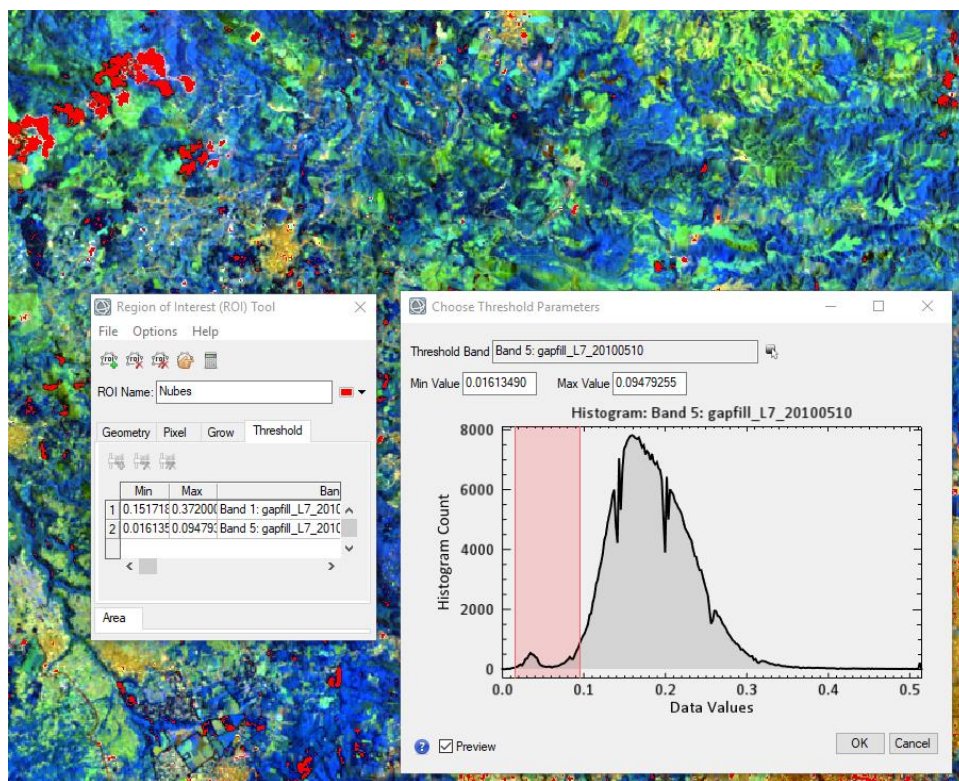
Fuente: Harris Geospatial (2015). *Modelamiento para imágenes digitales a partir de sensores remotos.*

2.1.13. Procesamiento para eliminación de nubes

Se deberá procesar una zona de interés, empleando la herramienta *ROI*, donde se diferenciarán las variaciones climáticas que impiden una visualización de la imagen ráster para su correcto análisis. Para ello, se deberán crear máscaras de nubes cuyo resultado será una imagen ráster sin valores; en la

pestaña *threshold*, en la que se tendrá la alternativa por medio de histogramas una aproximación, de los píxeles que no corresponde a los cuerpos sobre la superficie.

Figura 47. **Creación de una máscara para eliminación de nubes y sombras**



Fuente: Harris Geospatial (2015). *Modelamiento para imágenes digitales a partir de sensores remotos*.

2.1.14. Tasa anual de cambio

Los datos obtenidos para cada período analizado en el tiempo con las imágenes a partir de sensores remotos, es de suma importancia, ese cambio que

ha sufrido el área de interés, expresada en porcentaje (Camacho Sanabria, y otros, 2015) :

$$t = 1 - \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^{\frac{1}{n}}$$

En donde t es la tasa de cambio S₁ y S₂, son las áreas superficiales que se están evaluando, de la fecha inicial y final; donde finalmente, n es la variable que equivale al período de años en análisis.

2.1.15. Valor índice Kappa

Con el procesamiento y clasificación de las imágenes digitales, es importante el valor del índice de Kappa, siendo este un indicador adimensional, en el que nos indica el grado de confiabilidad de la clasificación, siendo esta complementaria con la matriz de confusión.

Tabla IX. **Valor del índice de Kappa**

| Valor K | Fuerza de concordancia |
|--------------------|-------------------------------|
| < 0.21 | Pobre |
| 0.21 - 0.40 | Débil |
| 0.41 - 0.60 | Moderada |
| 0.61 - 0.80 | Buena |
| 0.81 - 1.0 | Muy buena |

Fuente: Sánchez Ramos (2009). *Análisis Multitemporal de la Cobertura de la Tierra en la Cuenca del Valle de Jesús de Otoro entre los años 2000-2006, aplicando técnicas de teledetección.*

2.2. Aplicación de la metodología para Mora-Vahrson

Uno de los fundamentos para la determinación de amenazas a deslizamientos, fue evaluado por Mora-Vahrson, lo que en la comunidad geotécnica ha sido aceptada por su fácil interpretación ante este tipo de eventos. Permitiendo obtener una susceptibilidad del terreno, a partir de valores morfodinámicos (Mora Chinchilla, Chaves Gamboa, y Vásquez Fernández, 2015).

La Coordinadora Nacional para Reducción de Desastres emplea esta metodología, en la actualidad, para identificar las zonas a deslizamientos, que son productos de los elementos pasivos y de las acciones de los factores latentes, para desencadenar esta serie de elementos.

Para determinar el grado de susceptibilidad se evaluarán cinco valores y se les asignara los resultados obtenidos a partir del análisis con cartografía digital a partir de sensores remotos.

En la ecuación a continuación, se consideran los elementos pasivos y la acción de los factores detonantes, para la aplicación de la metodología de Mora-Vahrson.

$$H = (EP)(D)$$

H = Grado de susceptibilidad al deslizamiento.

EP= Susceptibilidad intrínseca del sitio.

D = Sumatoria de los factores detonantes o valor de disparo.

Los elementos pasivos estarán compuestos por la ecuación siguiente:

$$EP = (Sl)(Sh)(Sp)$$

- SI = valor de susceptibilidad de la litología, en donde los parámetros geomecánicos importantes son la cohesión y el ángulo de fricción interna.
- Sh = valor del parámetro de humedad del suelo, considerando una precipitación promedio mensual para su evaluación.
- Sp = valor del parámetro de pendiente, haciendo su clasificación en porcentaje.

El factor de disparo o factores detonantes se compone de las siguientes variables:

$$D = (Ds)(Dll)$$

Ds = parámetro de disparo por sismicidad (aceleración pico).

Dll = valor de disparo de lluvia para un periodo de retorno de cien años.

Derivando de las dos ecuaciones anteriores, se puede descomponer la susceptibilidad a deslizamientos, como una sumatoria de eventos provocados por sismos.

$$Hs = [(Sl)(Sh)(Sp)](Ds)$$

Hs = susceptibilidad a deslizamientos por sismos.

De igual forma, para el caso ante eventos de lluvia, la ecuación resultante es:

$$Hll = [(Sl)(Sh)(Sp)](Dll)$$

Hll = valor de susceptibilidad a deslizamientos por lluvia.

2.2.1. Parámetro de pendiente (SP)

Con los datos obtenidos en el mapa de pendientes, se puede denotar las zonas críticas evaluadas en la cartografía de pendientes, correspondiente a deslizamientos ocasionales, siendo su valor S_p = valor a evaluar.

Tabla X. Clases de pendiente y valor del parámetro S_p

| Clases de grado | Pendiente % | Características del terreno | Valor S_p |
|-----------------|-------------|---|-------------|
| 0 – 2 | 0 -2 | Planos sin denudación apreciable | 0 |
| 2 – 4 | 2 -7 | Pendiente muy baja, peligro de erosión | 1 |
| 4 -8 | 7 -15 | Pendiente baja, peligro severo de erosión | 2 |
| 8 – 16 | 15 -30 | Pendientes moderadas, deslizamientos ocasionales, peligro de erosión severo | 3 |
| 16-35 | 30 -70 | Pendiente fuerte, procesos de denudación intensos (deslizamientos) peligro extremo de erosión de suelos | 4 |
| 35-55 | 70 -140 | Pendiente muy fuerte, afloramientos rocosos, reforestación posible | 5 |
| 55 | >140 | Extremadamente fuerte, afloramientos rocosos procesos denudación intensos, (Caída de roca) cubierta vegetal limitadas | 6 |

Fuente: Mora Chinchilla, Chaves Gamboa, Y Vásquez Fernández (2015). *Zonificación de la susceptibilidad al deslizamiento: Resultados obtenidos para la península de Papagayo, mediante la modificación del método Mora Vahrson.*

2.2.2. Valores de disparo por lluvia (DII)

Con los datos registrados en el Insivumeh, para la estabilidad de taludes, se sugiere un período de retorno de cien años con una concentración de quince minutos; esta evaluación es tomada de las ecuaciones de las curvas IDF, teniendo cuidado al elegir los valores máximos de lluvia registrados.

Tabla XI. **Valores de Intensidad de lluvia para la ciudad de Guatemala**

| Tabla de intensidades - Tiempo de duración | | | | | | | | | | |
|---|----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Frecuencia | Duración en minutos | | | | | | | | | |
| Años | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 |
| 2 | 341.46 | 222.35 | 173.01 | 144.79 | 126.12 | 112.66 | 102.41 | 94.29 | 87.66 | 82.13 |
| 5 | 390.49 | 254.29 | 197.86 | 165.59 | 144.23 | 128.84 | 117.12 | 107.83 | 100.25 | 93.92 |
| 10 | 432.21 | 281.45 | 218.99 | 183.28 | 159.64 | 142.61 | 129.63 | 119.35 | 110.96 | 103.96 |
| 25 | 494.28 | 321.87 | 250.44 | 209.60 | 182.57 | 163.09 | 148.25 | 136.49 | 126.89 | 118.88 |
| 50 | 547.09 | 356.26 | 277.20 | 231.99 | 202.07 | 180.51 | 164.09 | 151.07 | 140.45 | 131.59 |
| 100 | 605.54 | 394.32 | 306.82 | 256.78 | 223.66 | 199.80 | 181.62 | 167.21 | 155.46 | 145.64 |
| 500 | 766.49 | 499.13 | 388.36 | 325.03 | 283.11 | 252.90 | 229.89 | 211.66 | 196.78 | 184.36 |

Fuente: INSIVUMEH (2012) *Datos de precipitación Guatemala.*

Tabla XII. **Valores de disparo de lluvia DII**

| Lluvias máximas en 24 horas, período de retorno 100 años | Descripción | Valor del parámetro DII |
|---|--------------------|--------------------------------|
| < 100 | Muy bajo | 1 |
| 100 – 200 | Bajo | 2 |
| 200 – 300 | Medio | 3 |
| 300 – 400 | Alto | 4 |
| >400 | Muy alto | 5 |

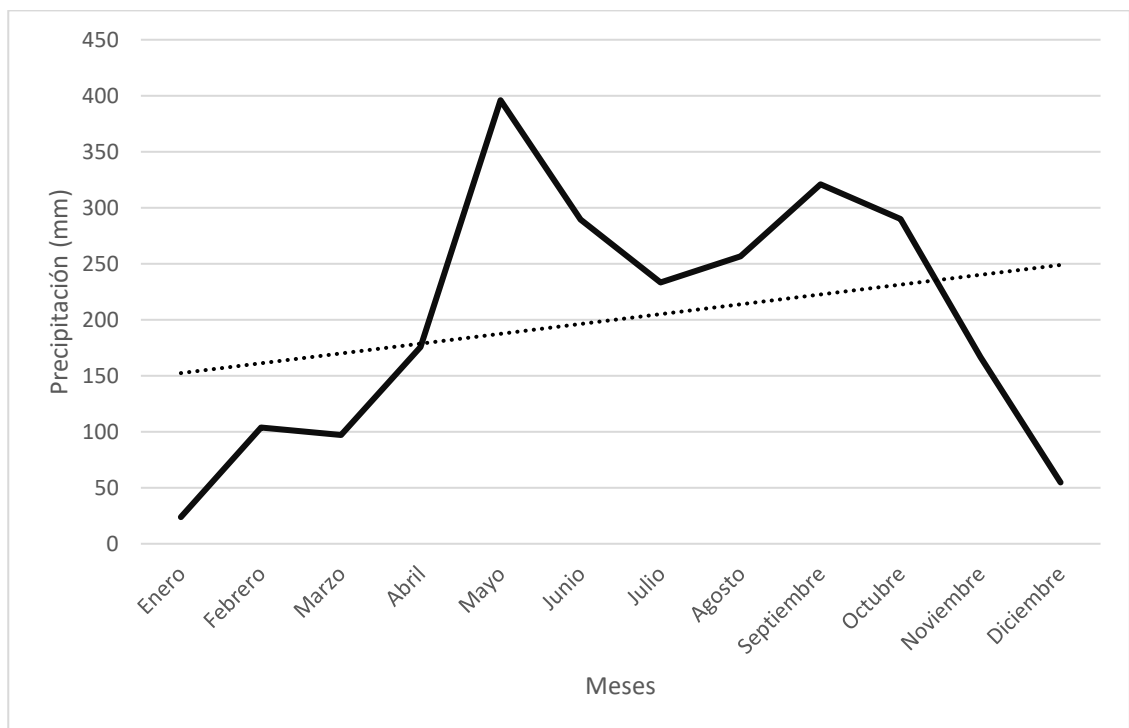
Fuente: Mora Chinchilla, Chaves Gamboa, Y Vásquez Fernández (2015). *Zonificación de la susceptibilidad al deslizamiento: Resultados obtenidos para la península de Papagayo, mediante la modificación del método Mora Vahrson.*

2.2.3. Valores asignados promedio de lluvia mensual

Para la determinación de la lluvia mensual deberá considerarse lo descrito en la tabla VIII, con ello aprobará la evaluación del grado de humedad que presenta

los suelos del área de influencia, los datos de precipitación inferiores a 250 mm/h, considerando la información generada por la estación del INSIVUMEH ubicada en la ciudad de Guatemala, con una data de 1998 a 2010, haciendo su clasificación de las lluvias máximas ocurridas en un período de veinticuatro horas, permitiendo crear el modelo de la ecuación resultante de lluvia, representados en la siguiente figura 48.

Figura 48. **Precipitación máxima mensual**



Fuente: Insivumeh (2012). *Precipitación ciudad de Guatemala.*

Tabla XIII. **Promedio mensual de lluvia**

| Promedio de precipitación mensual (mm) | Valor asignado |
|--|----------------|
| < 25 | 0 |
| 125 – 250 | 1 |
| >250 | 2 |

Fuente: Mora Chinchilla, Chaves Gamboa y Vásquez Fernández (2015). *Zonificación de la susceptibilidad al deslizamiento: resultados obtenidos para la península de Papagayo, mediante la modificación del método Mora Vahrson.*

En la tabla XIII, los valores de precipitación máxima mensual pertenecen a una suma total de doce, el cual deriva para la determinación del grado de humedad del terreno.

Tabla XIV. **Valores ajustados de precipitación al modelo de Mora-Vahrson**

| Datos de precipitación máxima | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|-------|---------|-------|-------|------|-------|-------|--------|------------|---------|-----------|-----------|
| Mes | Enero | Febrero | Marzo | Abril | Mayo | Junio | Julio | Agosto | Septiembre | Octubre | Noviembre | Diciembre |
| Precipitación mm/mensual | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 0 | 0 |

Fuente: Mora Chinchilla, Chaves Gamboa y Vásquez Fernández (2015). *Zonificación de la susceptibilidad al deslizamiento: resultados obtenidos para la península de Papagayo, mediante la modificación del método Mora Vahrson.*

2.2.4. Valores asignados para la humedad del terreno (Sh)

Con los valores promedio mensuales de precipitación, se determina el grado de humedad del área de influencia, donde deberá tenerse claro el rango de la suma de las lluvias máximas mensuales, derivados de la tabla XIV.

Tabla XV. Valores de humedad del terreno

| Suma de valores asignados a cada mes | Descripción | Valoración del parámetro S_h |
|--------------------------------------|-------------|--------------------------------|
| 0 - 4 | Muy bueno | 1 |
| 5 -9 | Bueno | 2 |
| 10 -14 | Medio | 3 |
| 15 -19 | Alto | 4 |
| 20 - 24 | Muy alto | 5 |

Fuente: Mora Chinchilla, Chaves Gamboa y Vásquez Fernández (2015). *Zonificación de la susceptibilidad al deslizamiento: resultados obtenidos para la península de Papagayo, mediante la modificación del método Mora Vahrson.*

2.2.5. Valores de disparo de sismicidad (Ds)

Con los resultados obtenidos en el espectro sísmico para la ciudad de Guatemala, el valor de la aceleración corresponde a 5.65 m/s^2 cuya intensidad de Mercalli es VIII, asignándole el grado de susceptibilidad a Elevado con un valor de seis.

Tabla XVI. **Valores de disparo de sismicidad**

| Intensidad mm | Aceleración (PGA) | | Grado de susceptibilidad | Valor Ds |
|-------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------------|-----------------|
| | (%) | (m/s²) | | |
| III | 1 – 12 | 0.098 - 1.226 | Leve | 1 |
| IV | 13 – 20 | 1.227 - 2.011 | Muy bajo | 2 |
| V | 21 - 29 | 2.012 - 2.894 | Bajo | 3 |
| VI | 30 - 37 | 2.895 - 3.679 | Moderado | 4 |
| VII | 38 - 44 | 3.680 - 4.365 | Medio | 5 |
| VIII | 45 - 55 | 4.366 - 5.445 | Elevado | 6 |
| IX | 56 - 65 | 5.446 - 6.426 | Fuerte | 7 |
| X | 66 - 73 | 6.427 - 7.210 | Bastante fuerte | 8 |
| XI | 74 - 85 | 7.211 - 8.388 | Muy fuerte | 9 |
| XII | >85 | >8.389 | Extremadamente fuerte | 10 |

Fuente: Mora Chinchilla, Chaves Gamboa y Vásquez Fernández (2015). *Zonificación de la susceptibilidad al deslizamiento: resultados obtenidos para la península de Papagayo, mediante la modificación del método Mora Vahrson.*

2.2.6. Valores de susceptibilidad litológica (SI)

Con las muestras extraídas de los taludes, se clasifican e identifican los valores litológicos, definidos en cinco rangos para su clasificación. Cuyos parámetros por evaluar serían el ángulo de fricción interna y la cohesión efectiva, en la que deberá realizarse su categorización, valorando con ello el grado de susceptibilidad.

Tabla XVII. **Valores de susceptibilidad litológica, SI**

| Ángulo de fricción efectiva (grados) | Cohesión efectiva (Kpa) | Descripción | Valoración del parámetro SI |
|---|--------------------------------|--------------------|------------------------------------|
| 0 – 15 | 0 – 10 | Muy bajo | 5 |
| 15 – 20 | 10 – 15 | Bajo | 4 |
| 20 – 25 | 15 – 20 | Medio | 3 |
| 25 – 30 | 20 -25 | Alto | 2 |
| 30 | 25 | Muy alto | 1 |

Fuente: Mora Chinchilla, Chaves Gamboa, Y Vásquez Fernández,(2015). *Zonificación de la susceptibilidad al deslizamiento: resultados obtenidos para la península de Papagayo, mediante la modificación del método Mora Vahrson.*

2.2.7. Clasificación de la litología e interpretación, aplicando la metodología de Mora – Vahrson

En las tablas XVIII y XIX respectivamente, se observa el rango de valores que representa la aplicación de la metodología de Mora – Vahrson.

Tabla XVIII. **Clasificación de susceptibilidad litológica, SI**

| Clase | Rango | Categoría |
|--------------|--------------|------------------|
| 1 | 0 – 6 | Muy bajo |
| 2 | 7 -32 | Bajo |
| 3 | 33 – 162 | Moderado |
| 4 | 163 -512 | Medio |
| 5 | 513 -1250 | Alto |
| 6 | > 1251 | Muy alto |

Fuente: Mora Chinchilla, Chaves Gamboa y Vásquez Fernández (2015). *Zonificación de la susceptibilidad al deslizamiento: resultados obtenidos para la península de Papagayo, mediante la modificación del método Mora Vahrson.*

Tabla XIX. **Calificación susceptibilidad a deslizamientos**

| Clase | Calificativo de susceptibilidad al deslizamiento | Características |
|--------------|---|--|
| I | Muy baja | Sectores estables, no requieren medidas correctivas. Debe considerar la influencia de los sectores aledaños con susceptibilidad de moderada a muy alta. |
| II | Baja | Sectores estables, requieren medidas correctivas menores solamente en casos especiales, debe considerar la influencia de los sectores aledaños con susceptibilidad de moderada a muy alta. |
| III | Moderada | No permitir la construcción de infraestructura, si no se mejora la condición del sitio. |
| IV | Alta | Probabilidad de deslizamiento alta en casos de sismos de magnitud importante y lluvias de intensidad alta. Se deben realizar estudios de detalle y medidas correctivas que aseguren la estabilidad del sector, en caso contrario, deben mantenerse como áreas de protección. |
| V | Muy alta | Probabilidad de deslizamiento muy alta en casos de sismos de magnitud importante y lluvias de intensidad alta. Se deben realizar estudios de detalle y medidas correctivas que aseguren la estabilidad del sector, en caso contrario, deben mantenerse como áreas de protección. |

Fuente: Mora Chinchilla, Chaves Gamboa y Vásquez Fernández (2015). *Zonificación de la susceptibilidad al deslizamiento: resultados obtenidos para la península de Papagayo, mediante la modificación del método Mora Vahrson.*

2.3. Caracterización geotécnica de los materiales

Una vez definido las características geométricas y topográficas, a partir de los sensores remotos, uno de los inconvenientes, es que no se tienen las propiedades geomecánicas del suelo, por lo que se interviene *in situ* con un muestreo para definir los valores de resistencia de los suelos, frente a los esfuerzos cortantes que están sometidas, las zonas susceptibles para su evaluación.

Generalmente, los métodos desarrollados para el cálculo de la estabilidad de taludes, naturales o artificiales están fundamentadas en la teoría del equilibrio límite. Esta consiste en que puede producirse una movilización de un esfuerzo cortante, a lo largo de toda la masa de suelo, que se despliega en los deslizamientos.

2.3.1. Resistencia cortante de los suelos

Durante la evaluación de los estratos en los taludes, constituidos principalmente por el terreno natural, se debe evaluar el esfuerzo cortante y su estado tensional, ya que estos parámetros tienden a producir el movimiento; por caso contrario para impedir ese movimiento, se presenta una resistencia tangencial. Es por eso, que un valor sea mayor a otro, condiciona la estabilidad de una superficie inclinada, para definir si es estable o no.

El ingeniero geotecnista, deberá tener claros los conceptos en el estudio de la resistencia al esfuerzo cortante: presión total, presión efectiva y presión intersticial.

2.3.2. Presión total (σ)

La presión total sobre un plano es la fuerza por unidad de su superficie que actúa sobre el área que se está investigando.

2.3.3. Presión efectiva (σ')

Establece la resistencia al esfuerzo cortante; es decir, si es sometida una muestra saturada de un estrato, este está formado por partículas de suelo y de agua, si se le induce un estado de tensiones, esos esfuerzos aplicados, serán absorbidos en diferentes proporciones; la que es absorbida por la parte sólida se le denomina presión granular, que, a efectos de la práctica para las evaluaciones de estabilidad, coincide con la presión efectiva.

2.3.4. Intersticial (μ)

Por sus propiedades, el agua no puede absorber esfuerzos cortantes, por definición siempre tendrá la componente de la normal.

2.3.5. Cohesión y ángulo de rozamiento interno

Dada a las características geomecánicas propias de los suelos, dependiendo de su formación, algunos materiales solo exhiben una componente de resistencia friccional o bien, una componente cohesiva (c), siendo el resultado de las fuerzas de atracción electroquímicas que tienen en un punto de contacto entre cada partícula. La componente resistente derivada de la cohesión es independiente del estado tensional, en aquellos materiales donde existe componente friccional, debida a la actuación del ángulo de rozamiento interno, conocida también como ángulo de fricción interna, donde la resistencia aumenta con la presión de confinamiento.

2.3.6. Resistencia residual

Cuando se aplica una tensión tangencial a una muestra de suelo, ésta se deformará paulatinamente hasta alcanzar el punto de rotura, determinada a una tensión pico. En algunos materiales, cuando se aplican las cargas, la deformación continua y la resistencia se reduce hasta alcanzar un valor mínimo que se denomina resistencia residual o resistencia última. Por lo tanto, el resultado de la resistencia residual es inferior que la resistencia pico, determinándose en momento que se manifieste la rotura (Instituto Tecnológico Minero de España, 1987).

2.3.7. Corte directo

El ensayo de corte directo es uno de los métodos más empleados y representativos para obtener valores de una mejor aproximación de la resistencia residual, donde las arenas flojas son ligeramente inferiores a los obtenidos en un ensayo triaxial. Este ensayo consiste en inducir una carga a una muestra de suelo, a través de la imposición de dos esfuerzos (normal y de corte), determinando con ello, los valores de cohesión y ángulo de fricción interna.

Los resultados obtenidos durante el ensayo son aplicados para dar una aproximación de la resistencia cortante en una situación de campo, donde se ha tenido una consolidación de los suelos, bajo los esfuerzos normales actuantes.

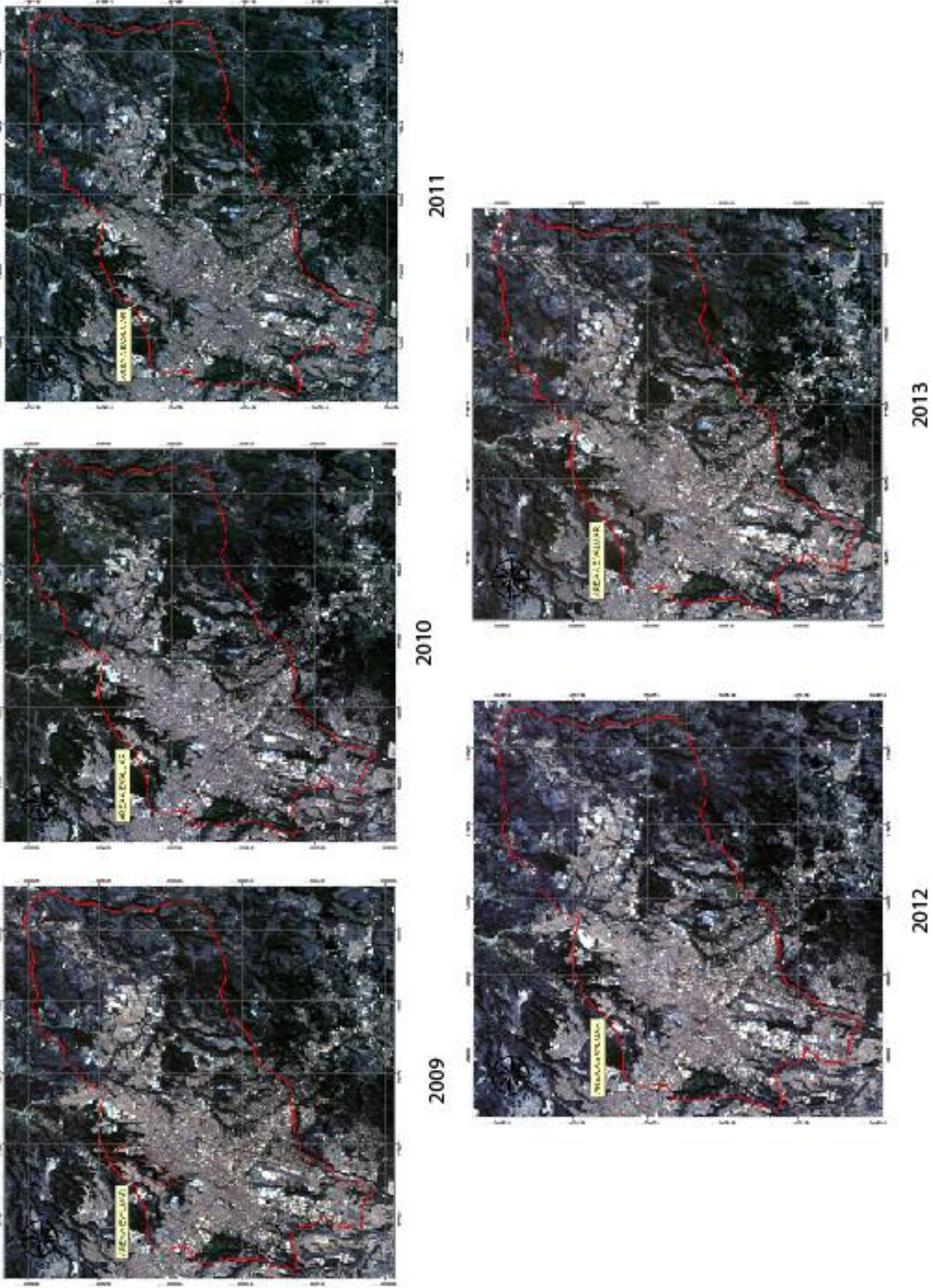
3. RESULTADOS MEDIANTE EL EMPLEO DE IMÁGENES SATELITALES

En los últimos años el incremento demográfico y la expansión de la metrópoli, se evidencia con una gran cantidad de edificaciones y el tráfico en algunos sectores. Los sensores remotos constituyen una herramienta para un ordenamiento territorial, pero en paralelo ayuda a una planificación en la identificación de zonas vulnerables donde pueden ocurrir deslizamientos debido a la topografía irregular del valle, según lo descrito en el capítulo 2. El análisis mediante las firmas espectrales emplea los sensores remotos Landsat 7 y 8, para generar mapas temáticos de análisis multitemporal, que consiste en la intersección de los dos modelos, para con ello validar las características de geomorfológicas más importantes del área de estudio.

3.1. Análisis multitemporal para el valle de la ciudad de Guatemala

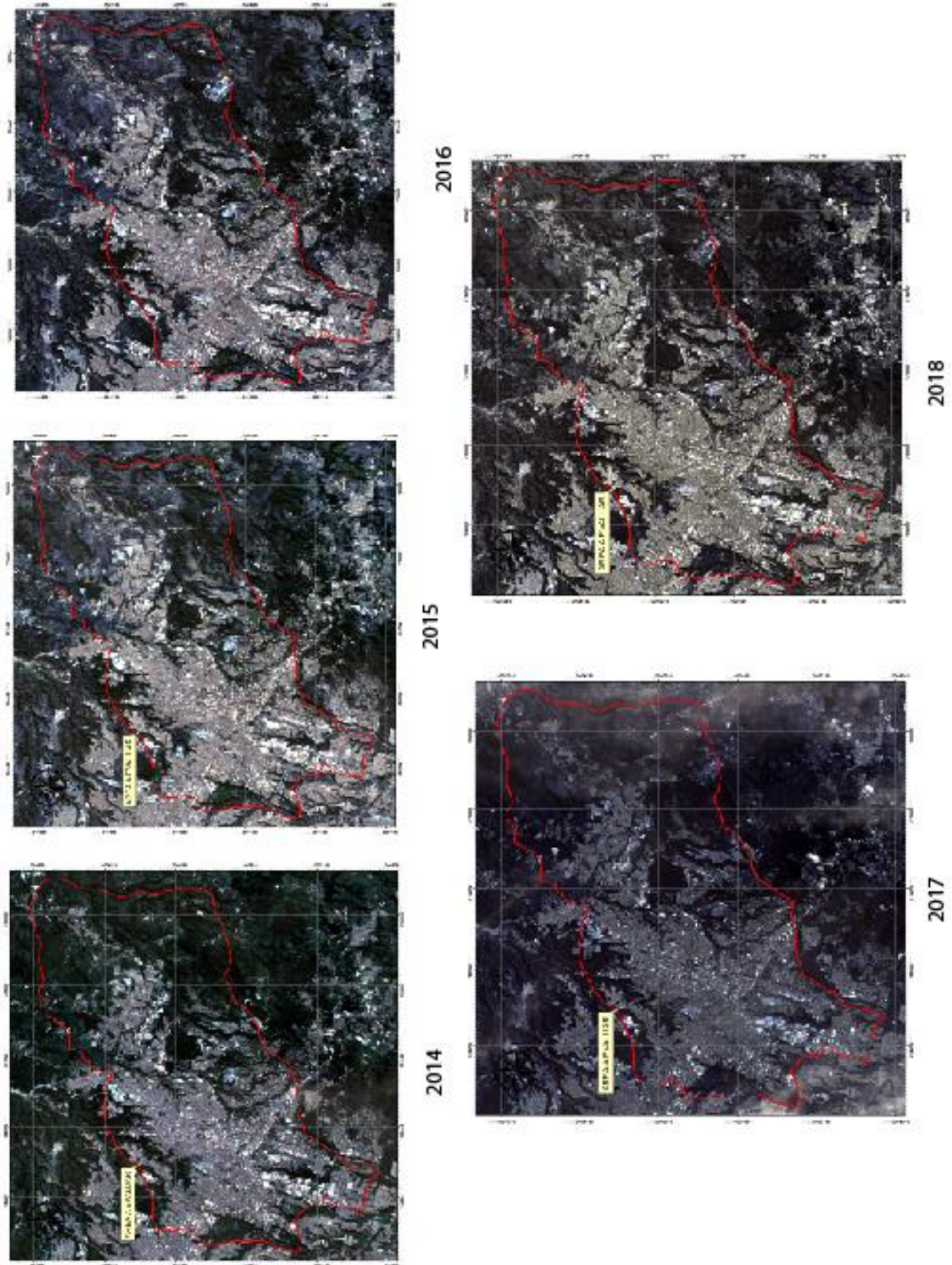
En las ilustraciones a continuación, se presentan las imágenes a partir de sensores remotos ya procesadas, tomando como línea base inicial la ciudad de Guatemala y luego, un acercamiento al sector del puente El Incienso, considerando que su expansión se sitúa en zonas no aptas para una infraestructura sin estudios adecuados.

Figura 49. Imágenes Landsat 7 año 2009 – 2013



Fuente: elaboración propia

Figura 50. Imágenes Landsat 8 año 2014 – 2018



Fuente: elaboración propia.

En los análisis de tipo multitemporal, es importante efectuar una clasificación de las imágenes ráster en las cuales se agregará una tabla de atributos, mediante una reclasificación. Para este estudio se complementó con la herramienta de *Arcgis* de convertir un ráster a polígono. En la tabla a continuación, se expone las variaciones en metros cuadrados, que se ha tenido en la Ciudad de Guatemala.

Tabla XX. **Valores de superficie en metros cuadrados para una evaluación con sensores remotos, empleando un análisis multitemporal**

| Landsat 7 (m²) | | | | | |
|----------------------------------|---------------|---------------|---------------|----------------|---------------|
| Descripción | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 |
| Nubes | 10,368,469.44 | 9,782,524.69 | 1,539,841.85 | 18,596,175.13 | 2,937,310.52 |
| Bosque y vegetación | 71,635,323.82 | 80,876,741.18 | 89,626,353.60 | 66,590,478.24 | 85,632,507.31 |
| Cuerpos de agua | 676,943.13 | 730,344.47 | 4,423,757.33 | 633,472.37 | 1,791,555.31 |
| Suelo | 32,723,960.80 | 35,395,393.92 | 32,085,060.91 | 25,656,154.61 | 27,127,070.31 |
| Zona urbana | 99,574,307.01 | 87,695,969.78 | 87,303,018.58 | 103,502,054.21 | 97,496,343.66 |

| Landsat 8 (m²) | | | | | |
|----------------------------------|----------------|----------------|---------------|---------------|---------------|
| Descripción | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
| Nubes | 6,301,107.96 | 4,287,449.29 | 24,137,748.89 | 7,645,481.72 | 7,645,481.72 |
| Bosque y vegetación | 103,199,608.09 | 81,547,573.50 | 79,080,017.95 | 82,680,266.61 | 82,680,266.61 |
| Cuerpos de agua | 2,533,738.66 | 731,047.51 | 255,453.16 | 570,136.00 | 570,136.00 |
| Suelo | 32,237,840.32 | 21,882,369.72 | 29,815,287.56 | 27,343,412.70 | 27,343,412.70 |
| Zona urbana | 70,725,658.88 | 106,540,935.29 | 81,699,826.75 | 96,736,220.23 | 96,736,220.23 |

Fuente: elaboración propia.

Para visualizar los porcentajes de cobertura que se posee dentro de la metrópoli, en la tabla a continuación, se exponen los metros cuadrados en porcentaje, para con ello darle una correcta interpretación para el análisis multitemporal para un período de tiempo de diez años.

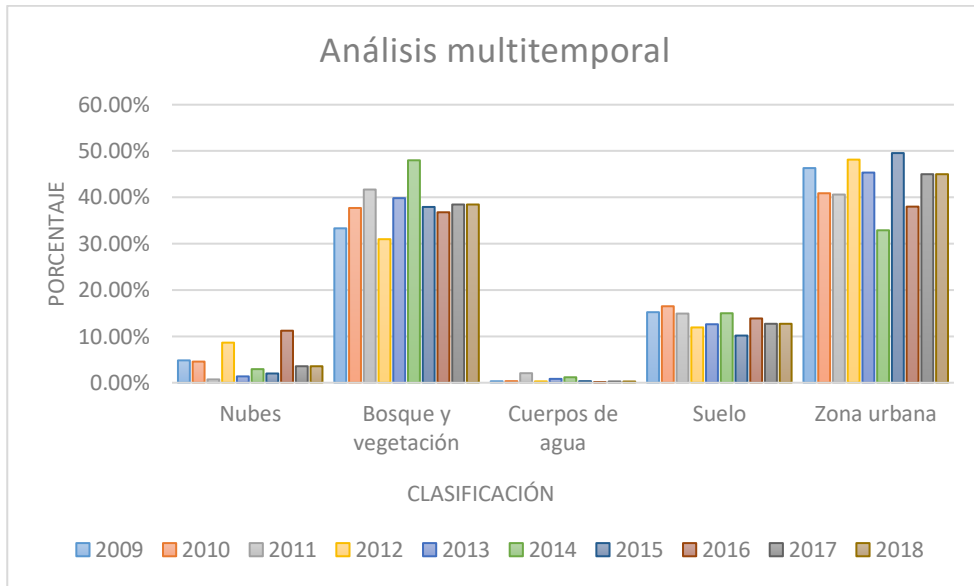
Tabla XXI. **Valores de superficie en porcentaje para una evaluación con sensores remotos, empleando un análisis multitemporal**

| Landsat 7 (Porcentaje de cobertura) | | | | | |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Descripción | <i>2009</i> | <i>2010</i> | <i>2011</i> | <i>2012</i> | <i>2013</i> |
| Nubes | 4.82 % | 4.56 % | 0.72 % | 8.65 % | 1.37 % |
| Bosque y vegetación | 33.32 % | 37.71 % | 41.69 % | 30.98 % | 39.83 % |
| Cuerpos de agua | 0.31 % | 0.34 % | 2.06 % | 0.29 % | 0.83 % |
| Suelo | 15.22 % | 16.50 % | 14.92 % | 11.93 % | 12.62 % |
| Zona urbana | 46.32 % | 40.89 % | 40.61 % | 48.15 % | 45.35 % |

| Landsat 8 (Porcentaje de cobertura) | | | | | |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Descripción | <i>2009</i> | <i>2010</i> | <i>2011</i> | <i>2012</i> | <i>2013</i> |
| Nubes | 2.93 % | 1.99 % | 11.23 % | 3.56 % | 3.56 % |
| Bosque y vegetación | 48.00 % | 37.93 % | 36.78 % | 38.46 % | 38.46 % |
| Cuerpos de agua | 1.18 % | 0.34 % | 0.12 % | 0.27 % | 0.27 % |
| Suelo | 14.99 % | 10.18 % | 13.87 % | 12.72 % | 12.72 % |
| Zona urbana | 32.90 % | 49.56 % | 38.00 % | 45.00 % | 45.00 % |

Fuente: elaboración propia.

Figura 51. **Análisis multitemporal empleando sensores remotos, para la ciudad de Guatemala**



Fuente: elaboración propia.

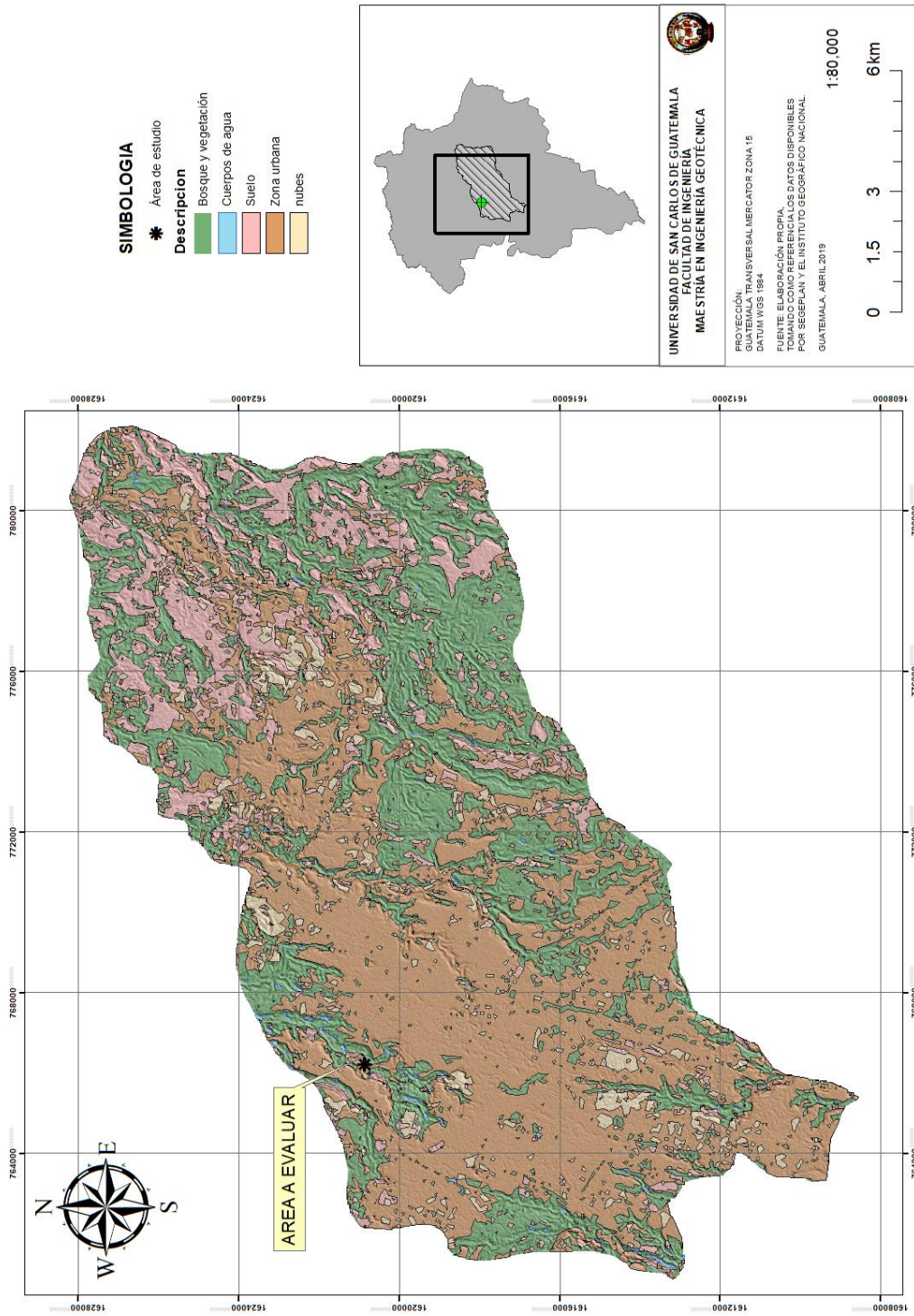
Cabe destacar que el acrecentamiento de la urbe ha generado un aumento en la cantidad de contaminación de los cuerpos de agua, que son derivados de la explotación de los mantos acuíferos, el área de las zonas urbanas evidencia que la construcción vertical ha sido muy significativa por lo cual han construido en las áreas con pendientes pronunciadas que muchas veces no han sido evaluadas adecuadamente.

En las imágenes siguientes se exponen los resultados de la clasificación de los modelos generados mediante el empleo de herramientas especializadas para evaluación y clasificación de imágenes digitales.

Para procesarlas se emplearán las mismas, pero se transformarán en una imagen vectorial, para una mejor visualización y facilidad de procesamiento de datos. Se clasificarán de acuerdo con lo descrito en el capítulo dos.

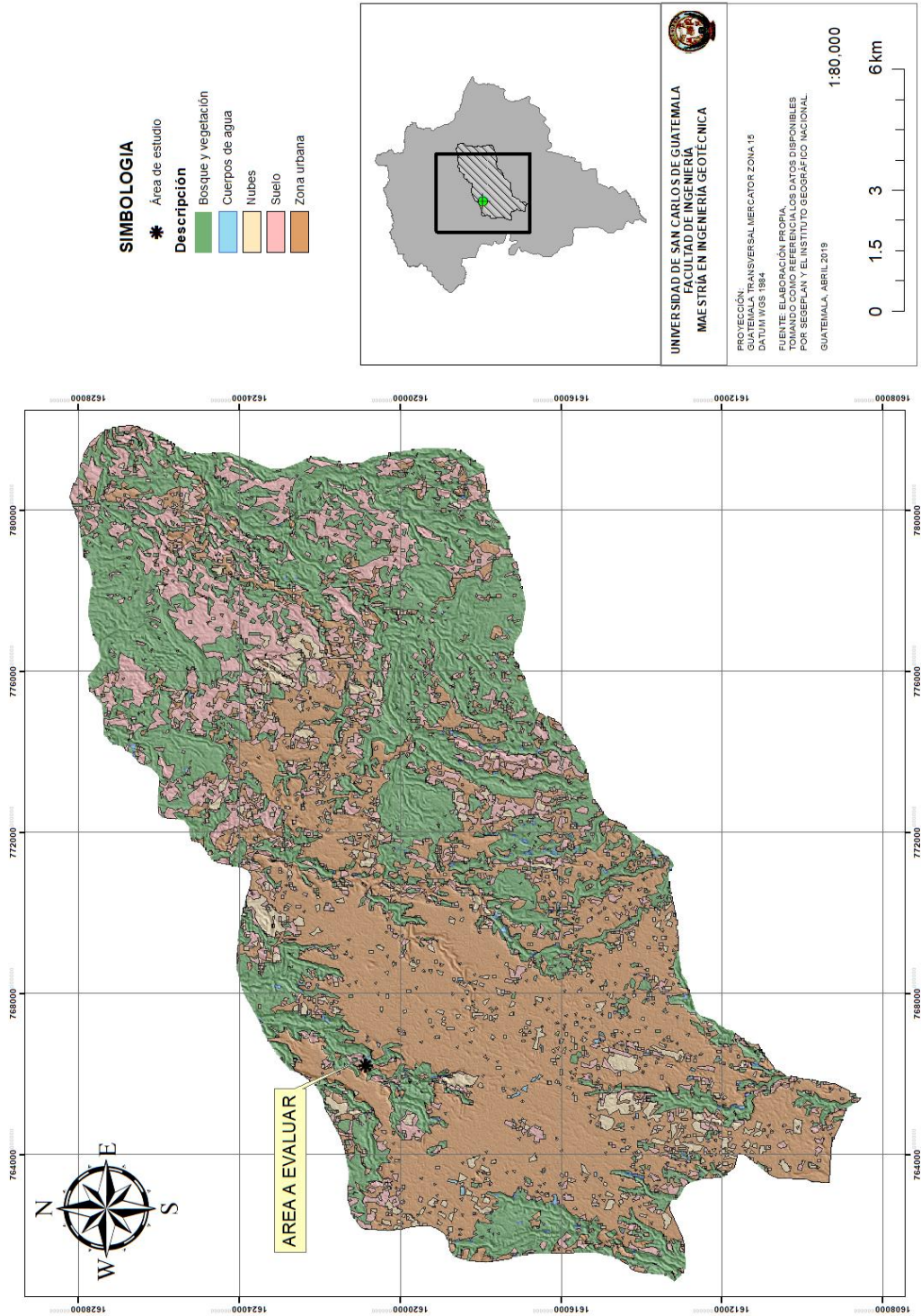
Por medio de tablas de atributos, se pueden estimar las áreas y características propias para validar el comportamiento de la expansión del área de interés, que este caso, sería hacer la delimitación de la superficie de la barranca El Incienso.

Figura 52. Procesamiento de imagen digital Landsat 7 año 2009



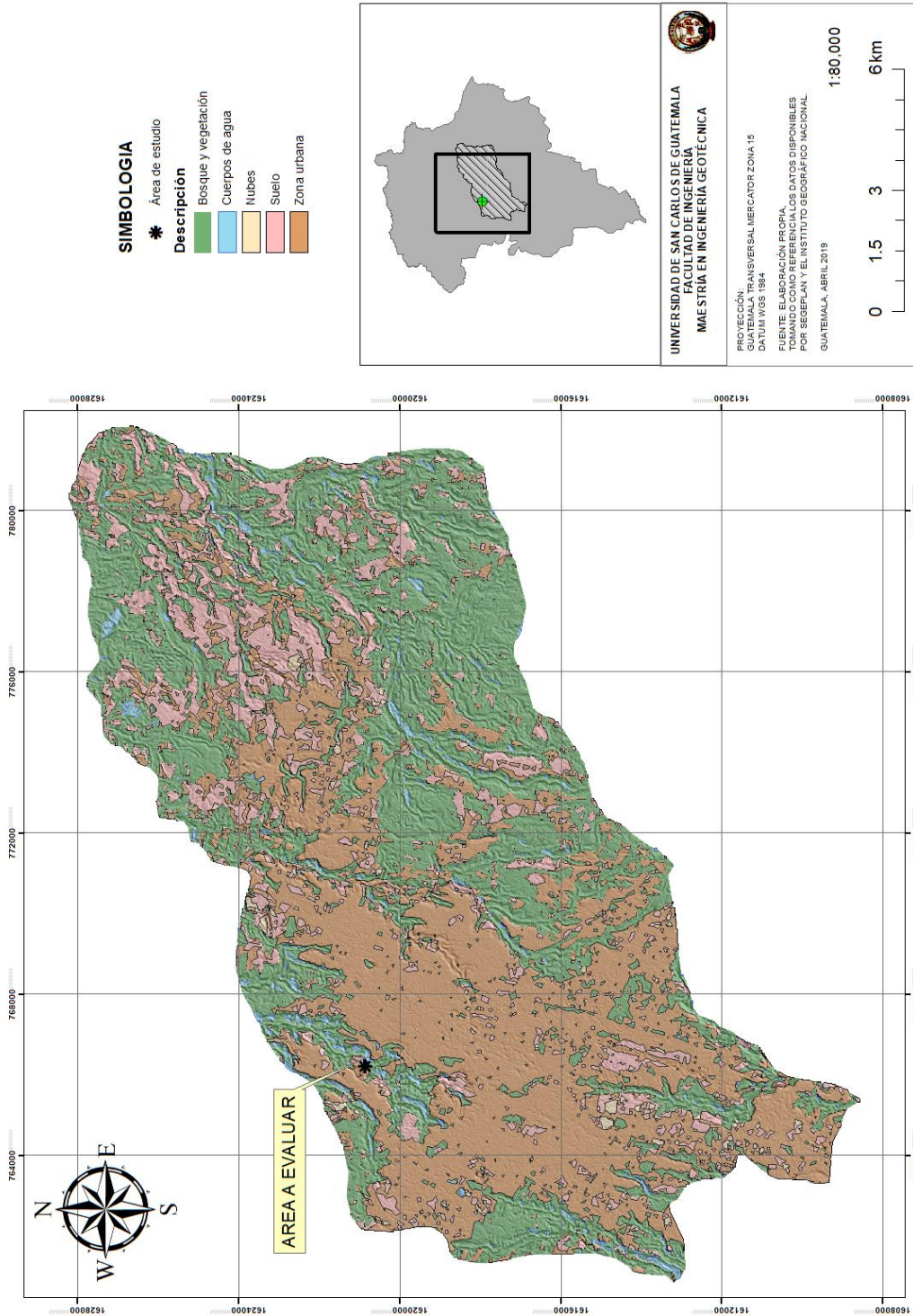
Fuente: elaboración propia.

Figura 53. Procesamiento de imagen digital Landsat 7 año 2010



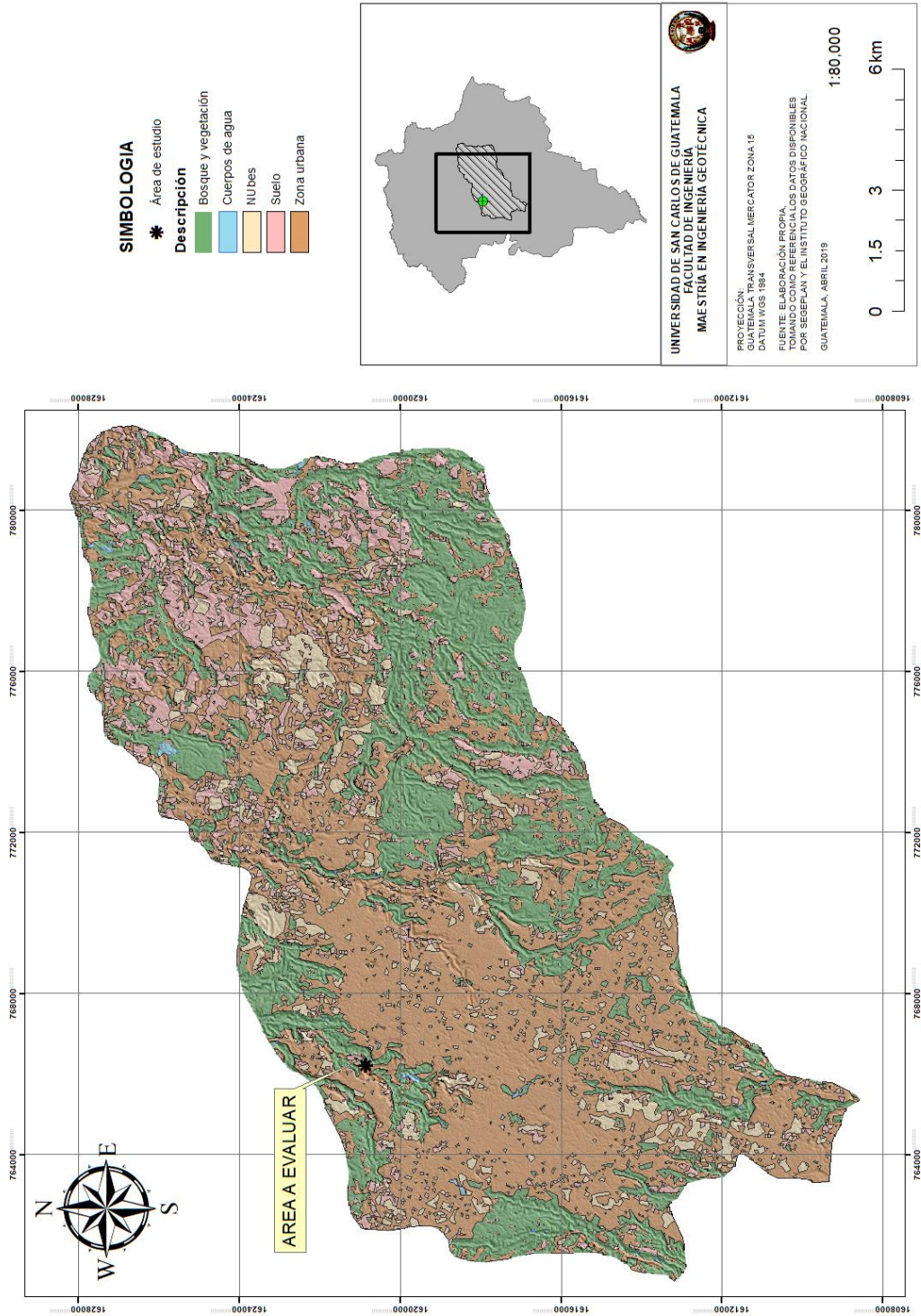
Fuente: elaboración propia.

Figura 54. Procesamiento de imagen digital Landsat 7 año 2011



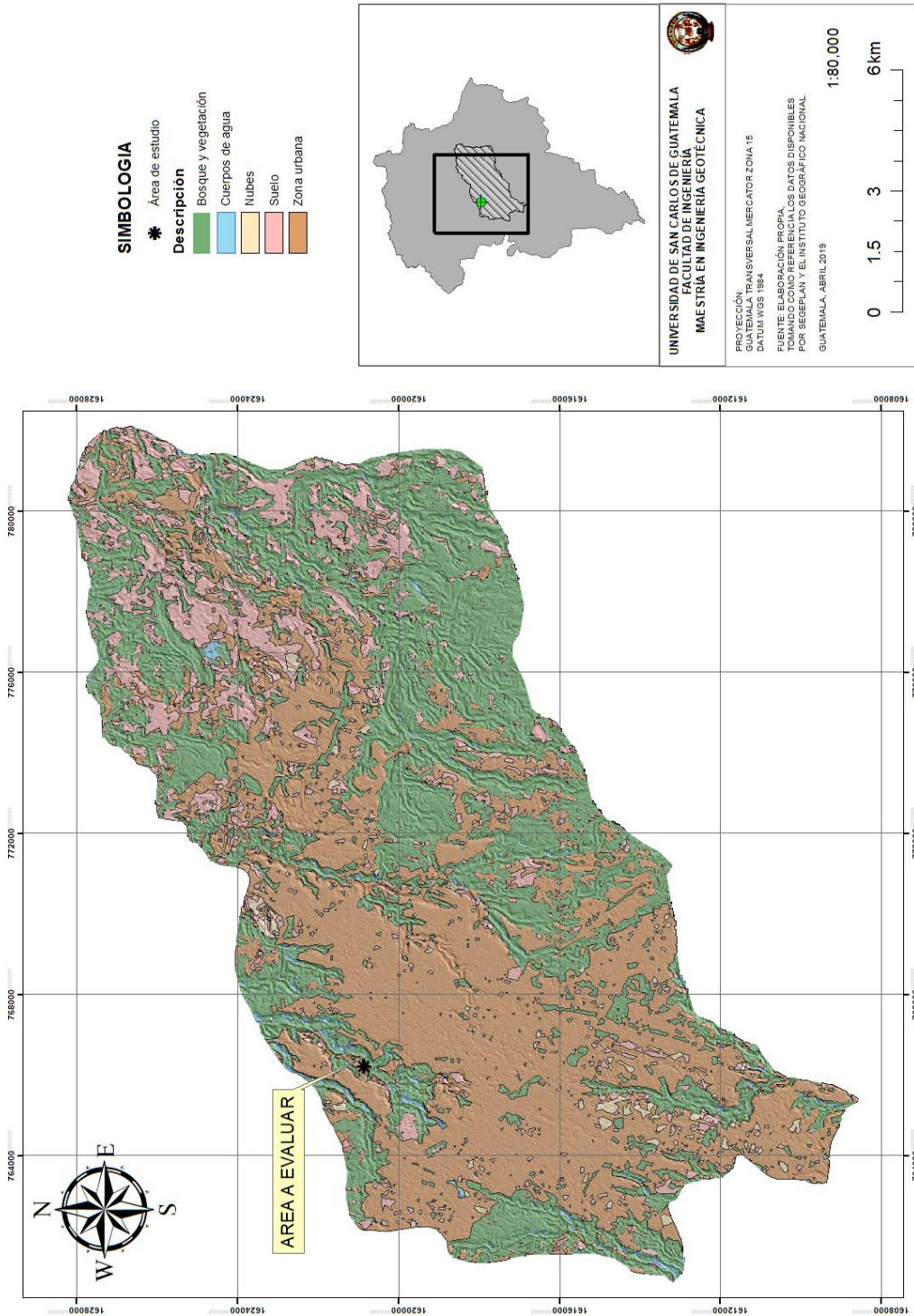
Fuente: elaboración propia.

Figura 55. Procesamiento de imagen digital Landsat 7 año 2012



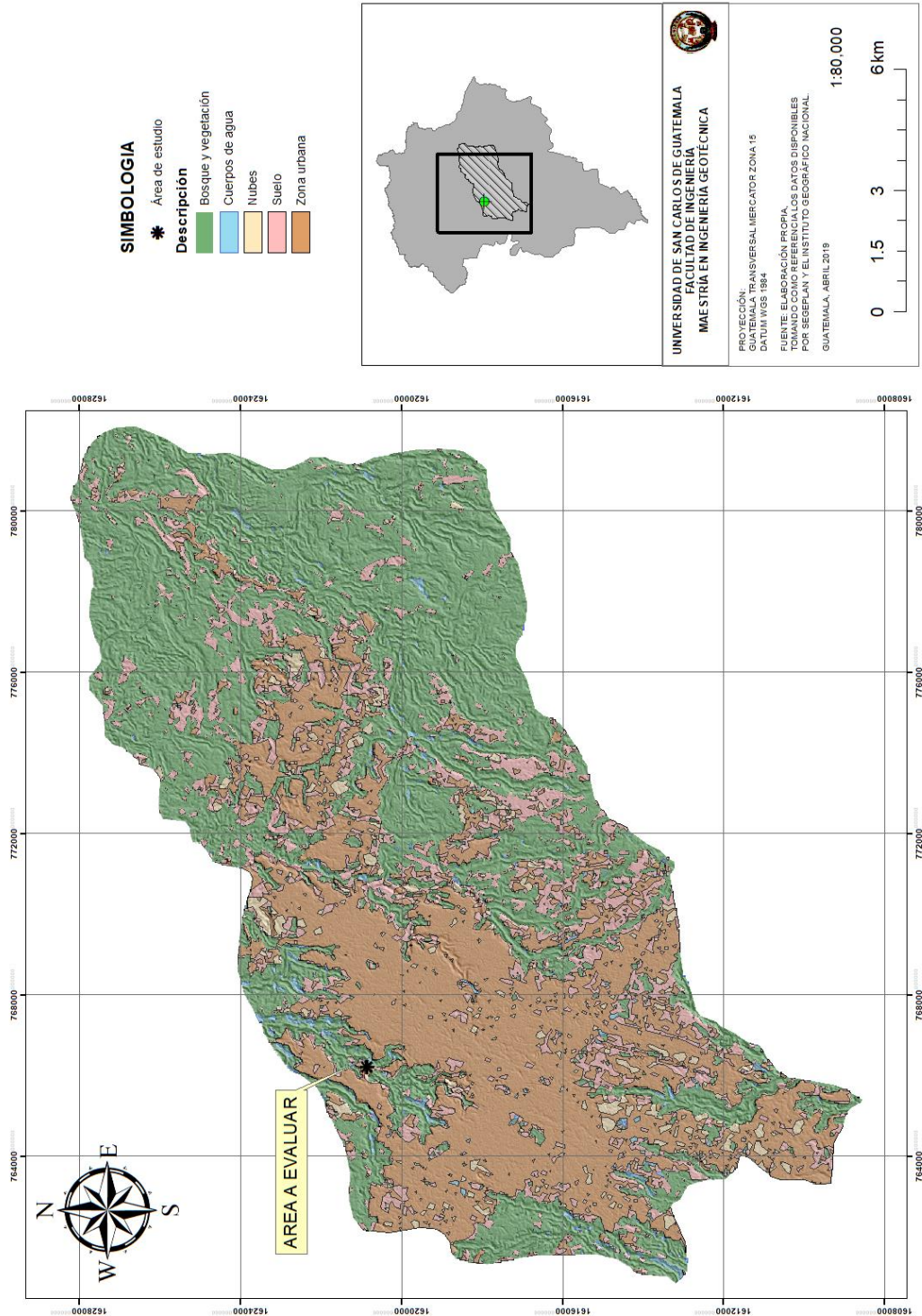
Fuente: elaboración propia.

Figura 56. Procesamiento de imagen digital Landsat 7 año 2013



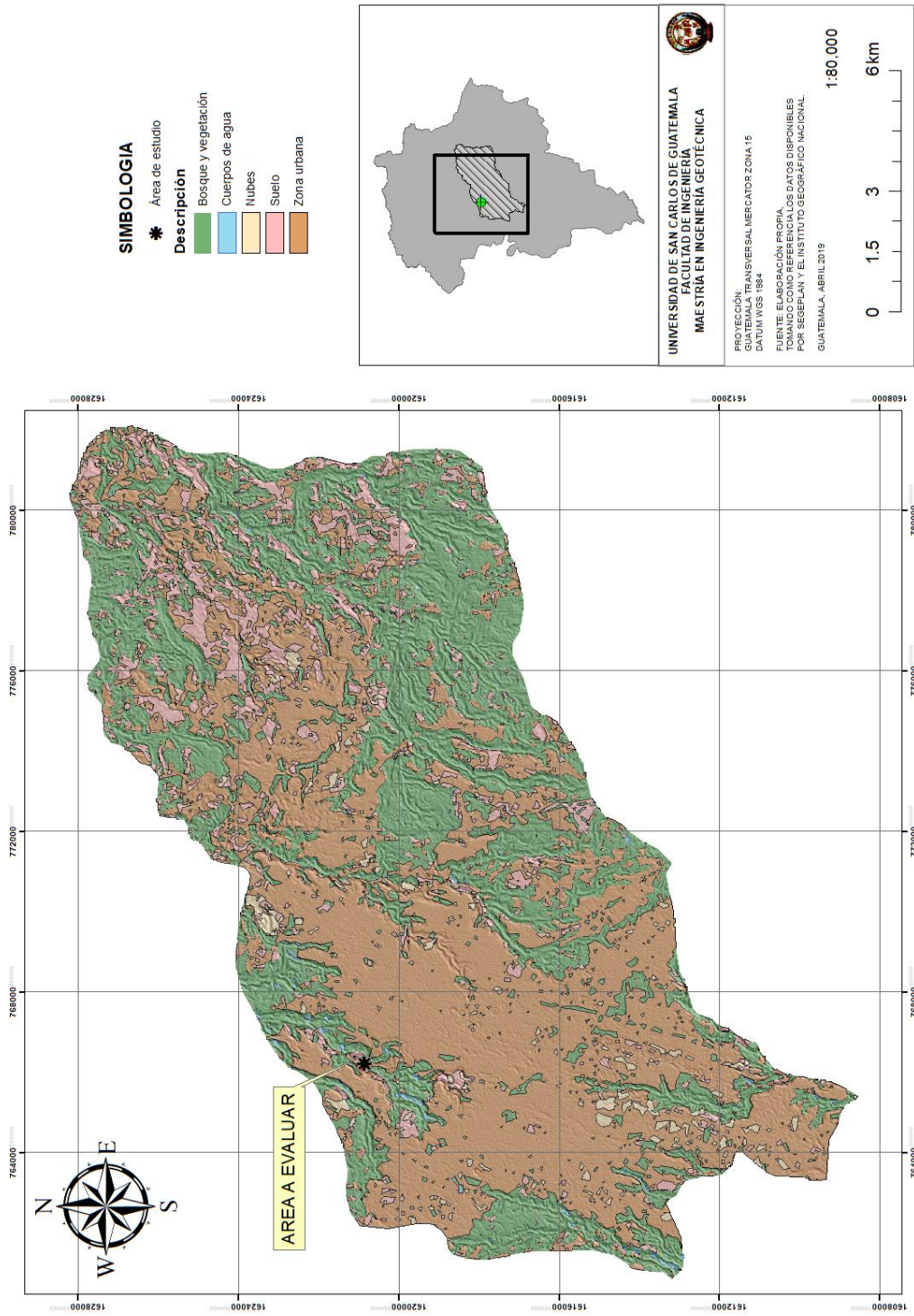
Fuente: elaboración propia.

Figura 57. Procesamiento de imagen digital Landsat 8 año 2014



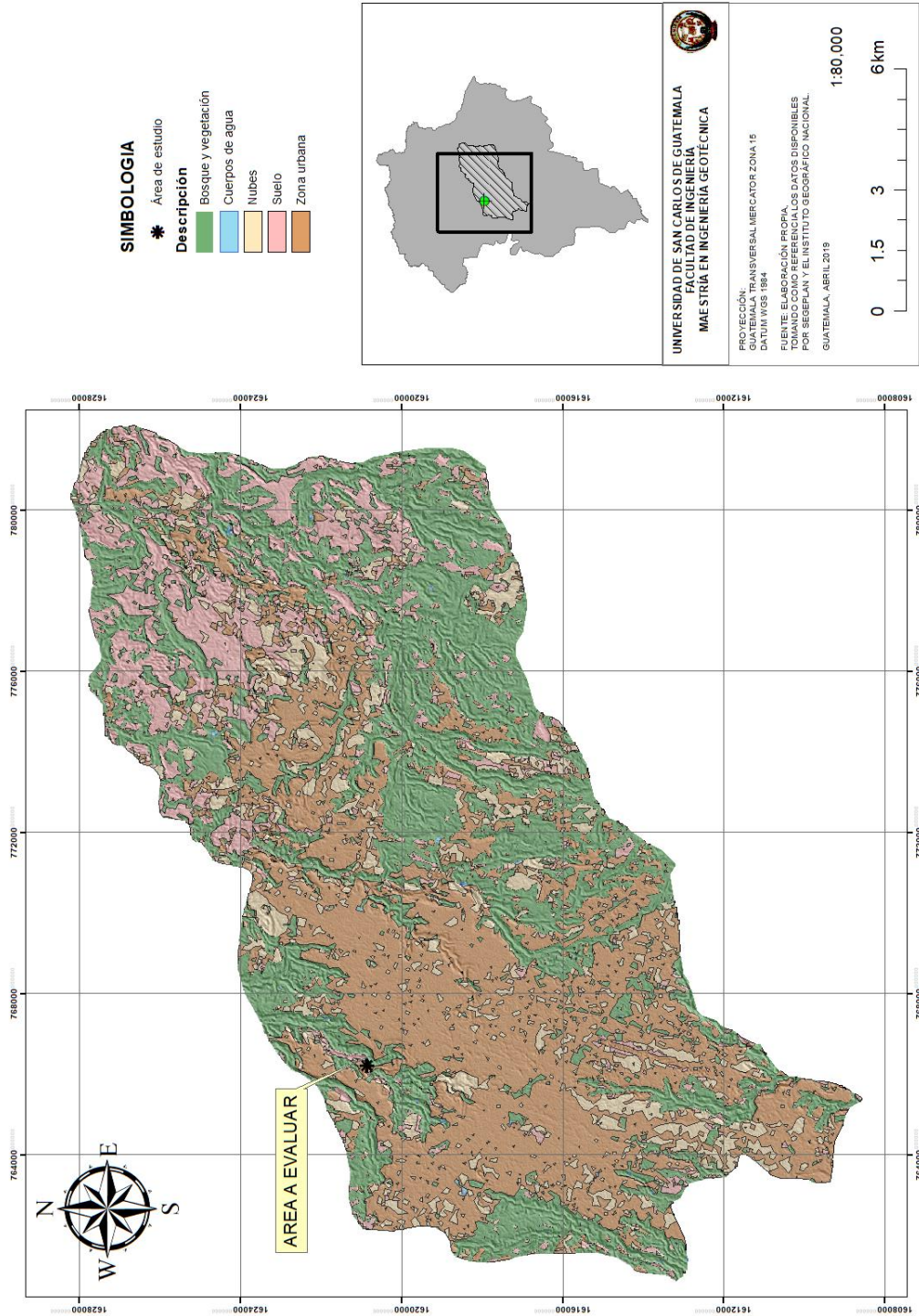
Fuente: elaboración propia.

Figura 58. Procesamiento de imagen digital Landsat 8 año 2015



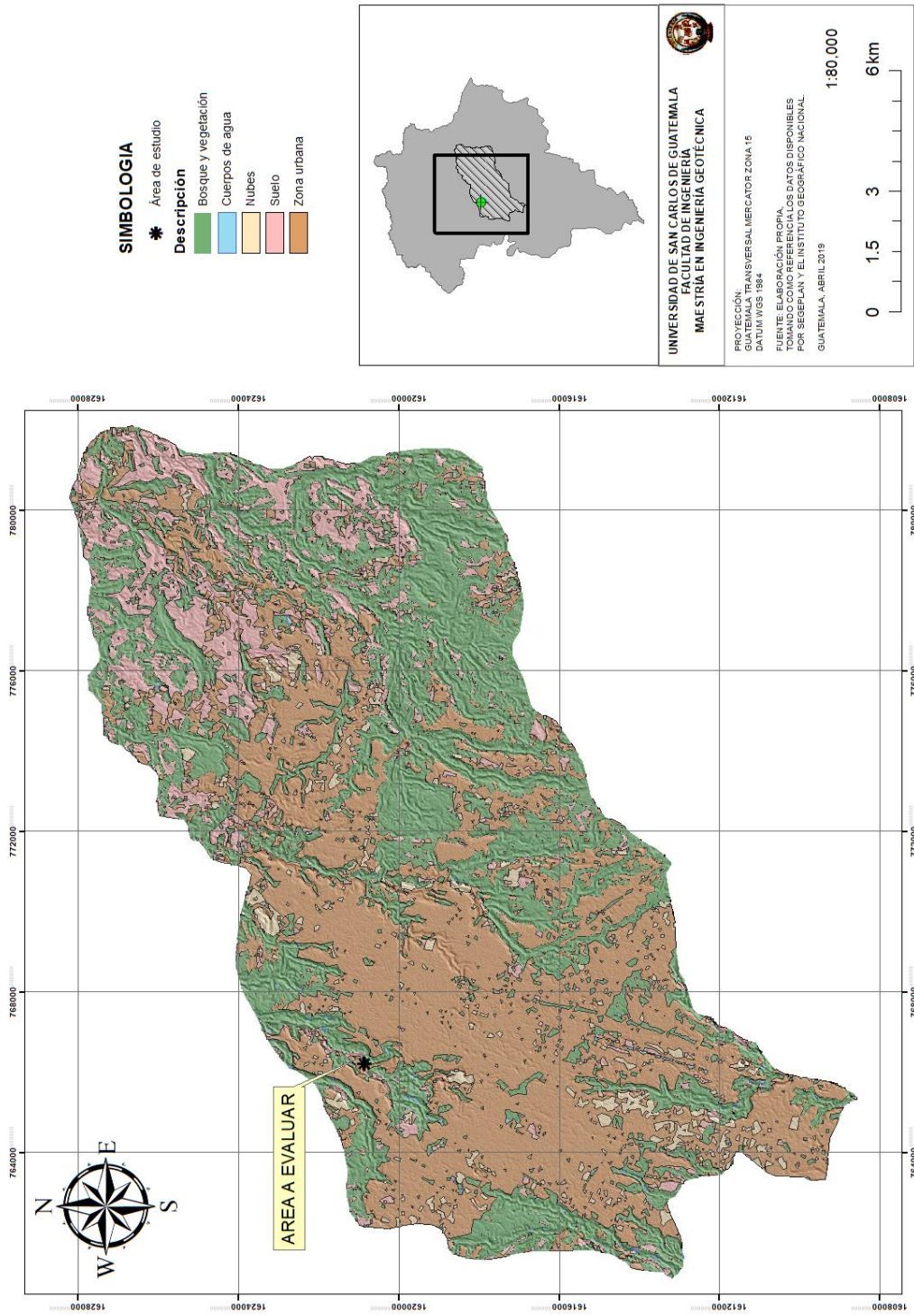
Fuente: elaboración propia.

Figura 59. Procesamiento de imagen digital Landsat 8 año 2016



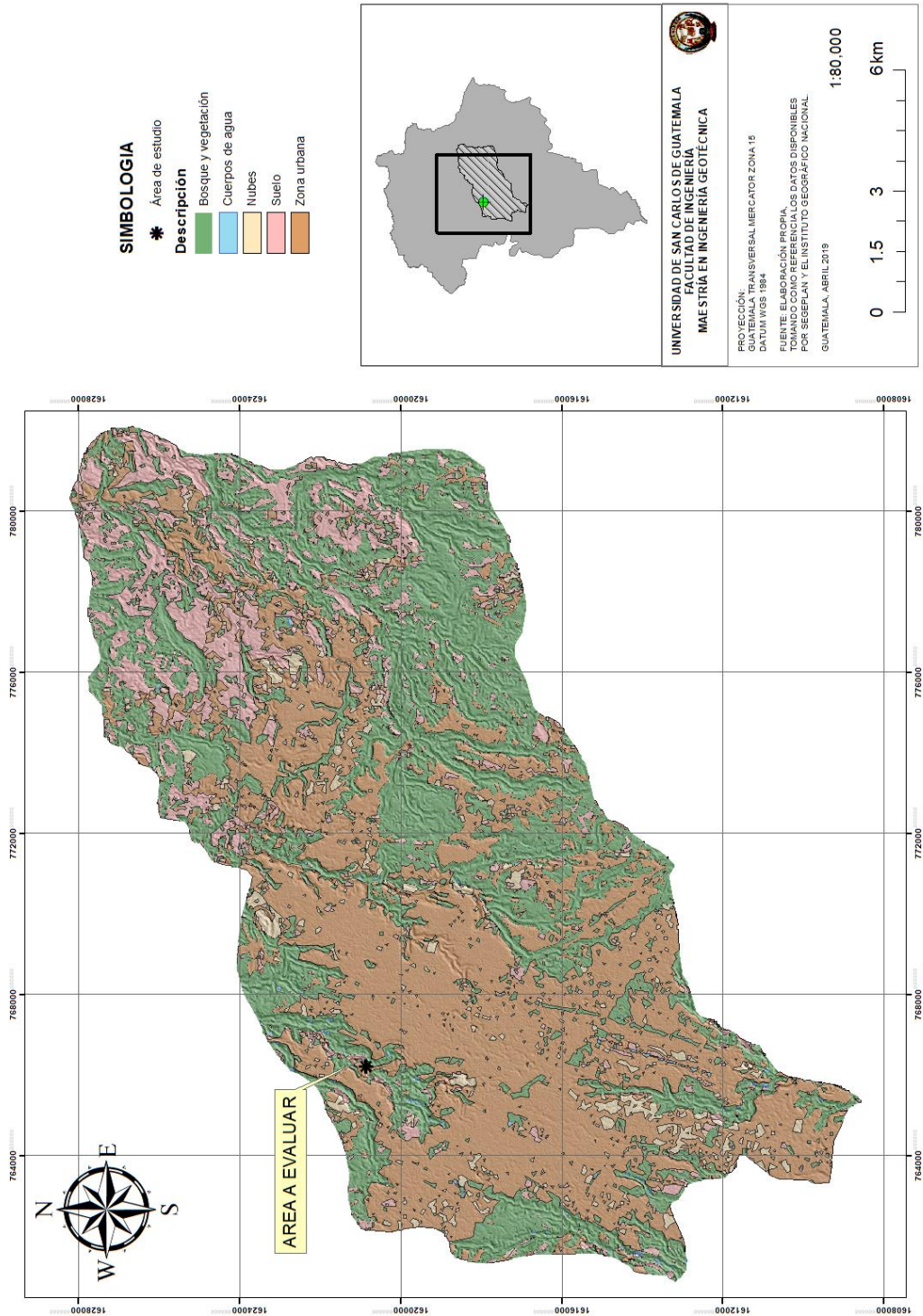
Fuente: elaboración propia.

Figura 60. Procesamiento de imagen digital Landsat 8 año 2017



Fuente: elaboración propia.

Figura 61. Procesamiento de imagen digital Landsat 8 año 2018



Fuente: elaboración propia.

3.1.1. Análisis multitemporal para el caso de estudio

Los modelos generados y procesados de las imágenes digitales servirán como línea base para delimitar el área de estudio. Para ello, se debe cuidar la calidad de la data para una correcta interpretación y evaluar aquellas zonas que se encuentren vulnerables ante un deslizamiento.

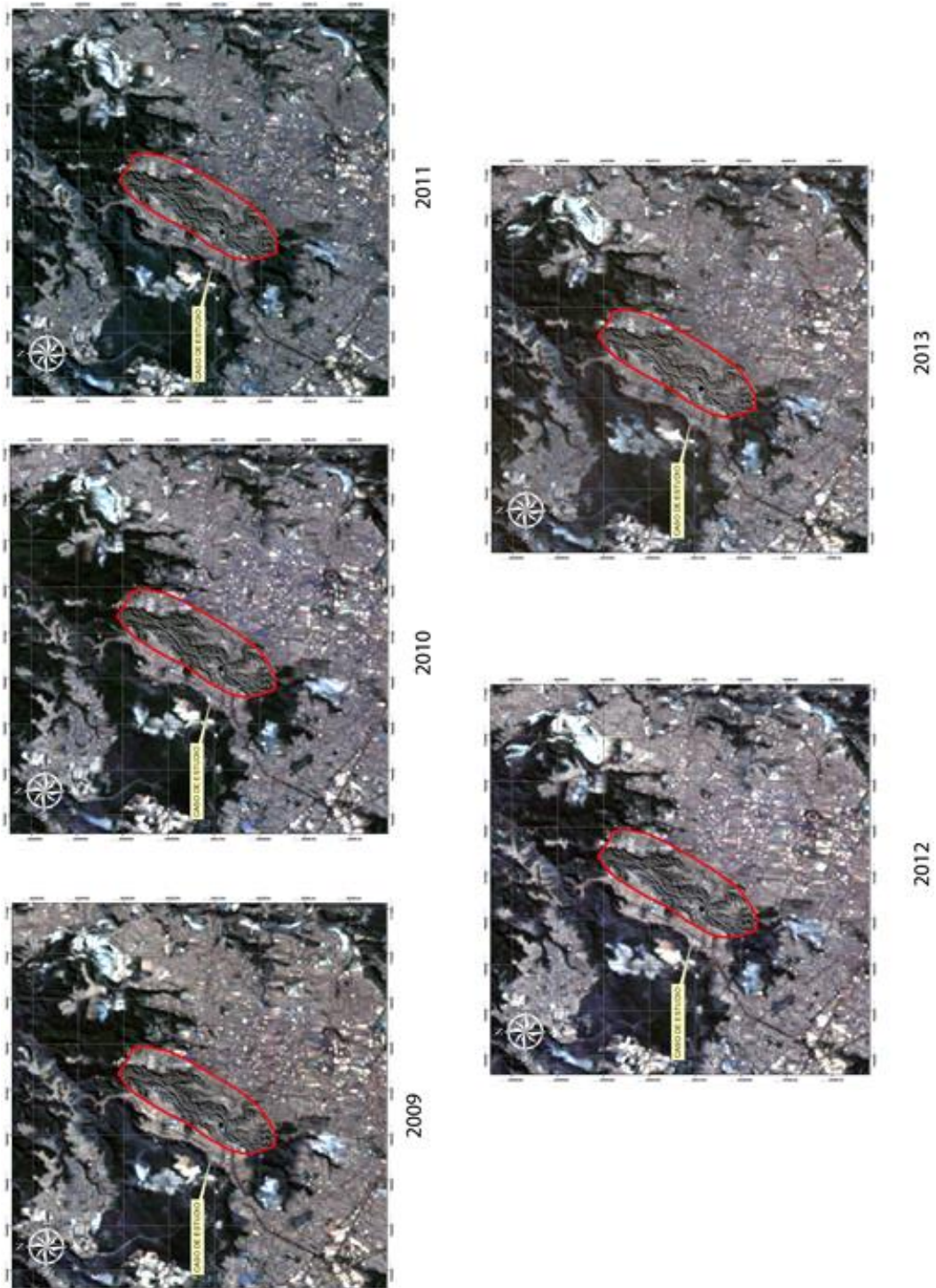
Tabla XXII. **Clasificación mediante el empleo de imágenes satelitales a los alrededores del puente El Incienso**

| Landsat 7 (m²) | | | | | |
|----------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Descripción | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 |
| Nubes | 92,609.43 | 122,797.19 | 17,230.55 | 234,975.24 | 18,317.47 |
| Bosque y vegetación | 1,832,619.85 | 1,903,049.52 | 1,850,532.19 | 1,787,599.67 | 1,937,305.19 |
| Cuerpos de agua | 101,524.24 | 37,539.95 | 458,362.69 | 60,443.41 | 224,425.09 |
| Suelo | 304,278.93 | 405,221.82 | 415,910.77 | 183,747.42 | 175,740.28 |
| Zona urbana | 1,745,768.44 | 1,594,692.40 | 1,334,764.69 | 1,810,035.15 | 1,721,012.86 |

| Landsat 8 (m²) | | | | | |
|----------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
| Nubes | 80,814.51 | 42,648.33 | 366,850.47 | 97,561.98 | 97,561.98 |
| Bosque y vegetación | 1,923,407.02 | 1,867,389.63 | 1,995,516.40 | 2,002,077.14 | 2,002,077.14 |
| Cuerpos de agua | 241,578.86 | 87,258.48 | 11,087.04 | 53,939.73 | 53,939.73 |
| Suelo | 552,874.58 | 366,285.05 | 311,400.93 | 309,617.46 | 309,617.46 |
| Zona urbana | 1,278,125.91 | 1,713,219.40 | 1,391,946.05 | 1,613,604.57 | 1,613,604.57 |

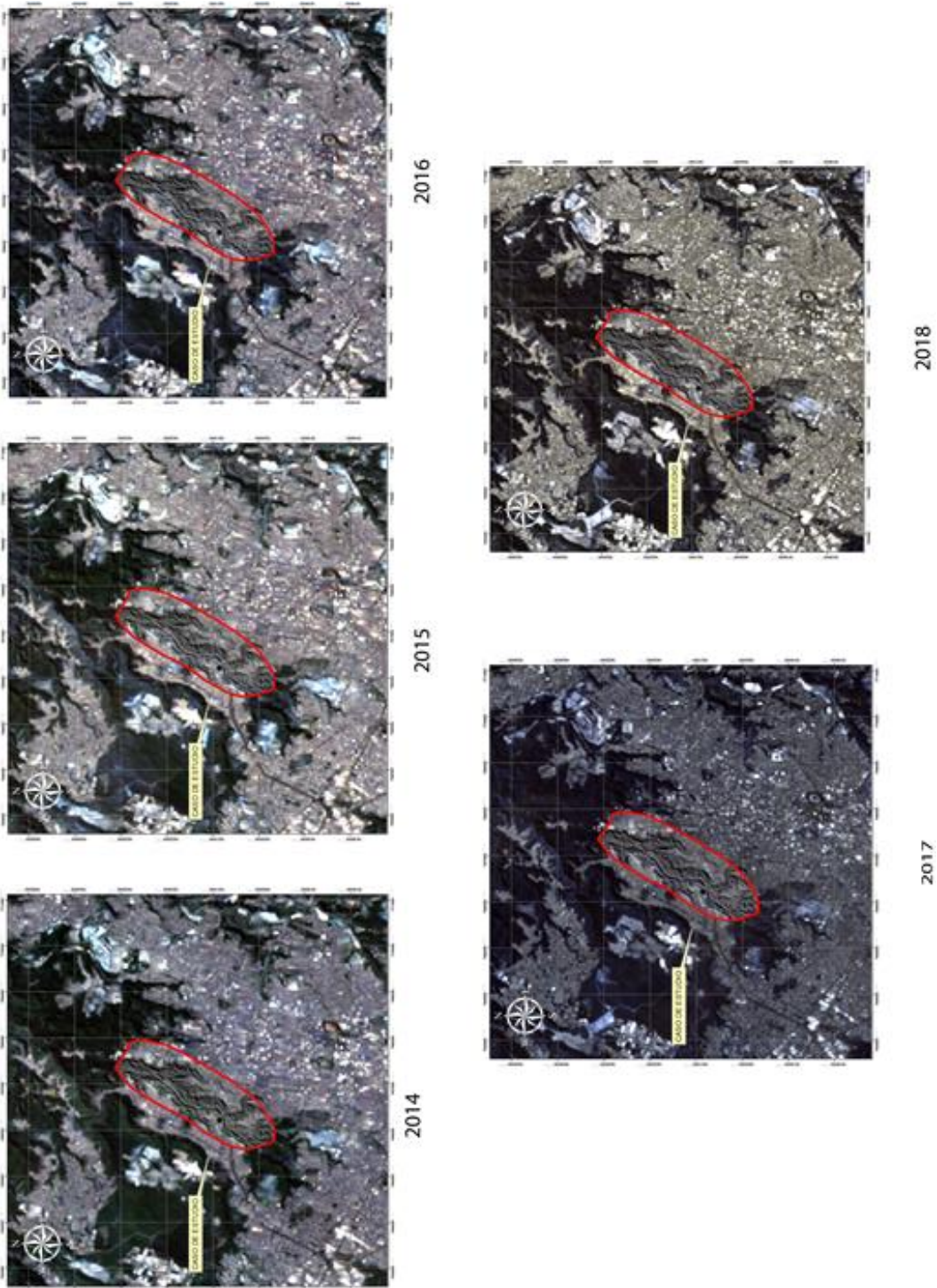
Fuente: elaboración propia.

Figura 62. Procesamiento imagen digital caso de estudio, Landsat 7 año 2009 - 2013



Fuente: elaboración propia.

Figura 63. Procesamiento imagen digital caso de estudio, Landsat 8 año 2014 - 2018



Fuente: elaboración propia.

El procesamiento y la cartografía generada permitirá evaluar y determinar el porcentaje de crecimiento según las clasificaciones asignadas a la imagen satelital, haciendo su distribución de las áreas obtenidas en la tabla anterior, en unidades de porcentaje.

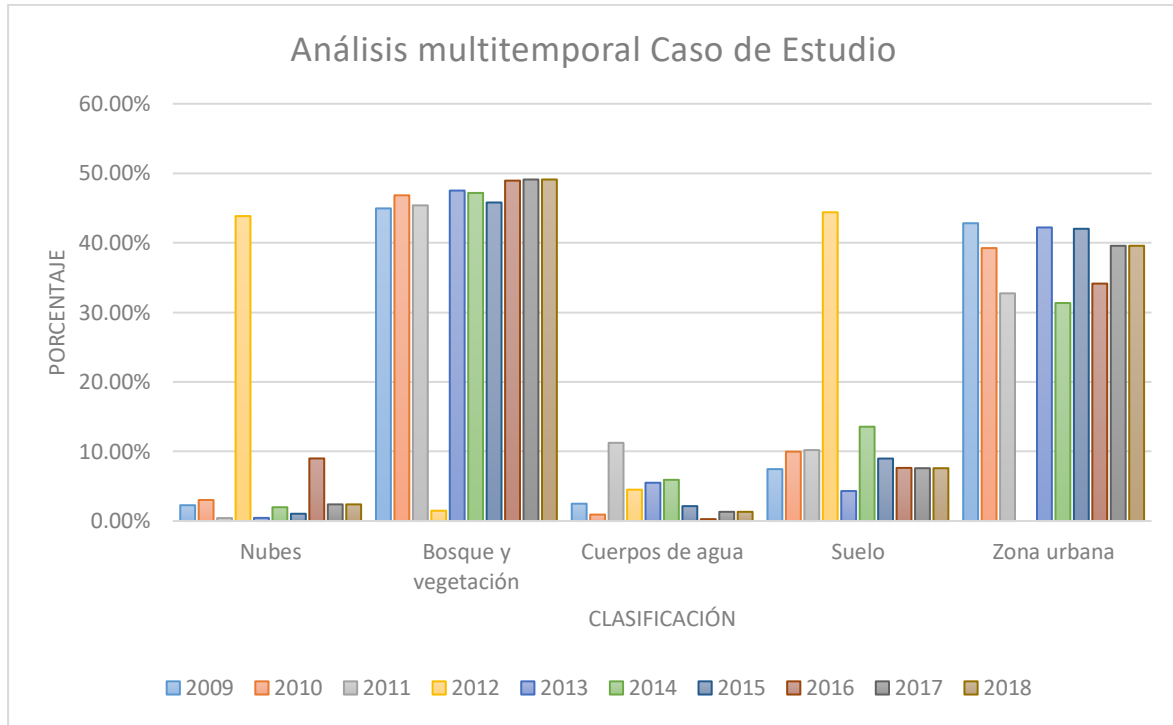
Tabla XXIII. **Porcentaje de las áreas, alrededor del puente El Incienso**

| Landsat 7 (Porcentaje de cobertura) | | | | | |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Descripción | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 |
| Nubes | 2.27 % | 3.02 % | 0.42 % | 43.85 % | 0.45 % |
| Bosque y vegetación | 44.95 % | 46.84 % | 45.39 % | 1.48 % | 47.52 % |
| Cuerpos de agua | 2.49 % | 0.92 % | 11.24 % | 4.51 % | 5.50 % |
| Suelo | 7.46 % | 9.97 % | 10.20 % | 44.40 % | 4.31 % |
| Zona urbana | 42.82 % | 39.25 % | 32.74 % | 0.00 % | 42.21 % |

| Landsat 8 (Porcentaje de cobertura) | | | | | |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
| Nubes | 1.98 % | 1.05 % | 9.00 % | 2.39 % | 2.39 % |
| Bosque y vegetación | 47.18 % | 45.81 % | 48.95 % | 49.11 % | 49.11 % |
| Cuerpos de agua | 5.93 % | 2.14 % | 0.27 % | 1.32 % | 1.32 % |
| Suelo | 13.56 % | 8.98 % | 7.64 % | 7.59 % | 7.59 % |
| Zona urbana | 31.35 % | 42.02 % | 34.14 % | 39.58 % | 39.58 % |

Fuente: elaboración propia.

Figura 64. **Porcentaje de cobertura para el caso de estudio**



Fuente: elaboración propia.

Con los resultados obtenidos en las tablas XIII, se debe calcular el porcentaje de la tasa de cambio anual, para cada período analizado y la cobertura clasificada. En el que el especialista en sistemas de información geográfica le permitirá evaluar la zona de clasificación, según los años que se tengan de interés, haciendo la observación que su periodo a valorar no sea menor a diez años.

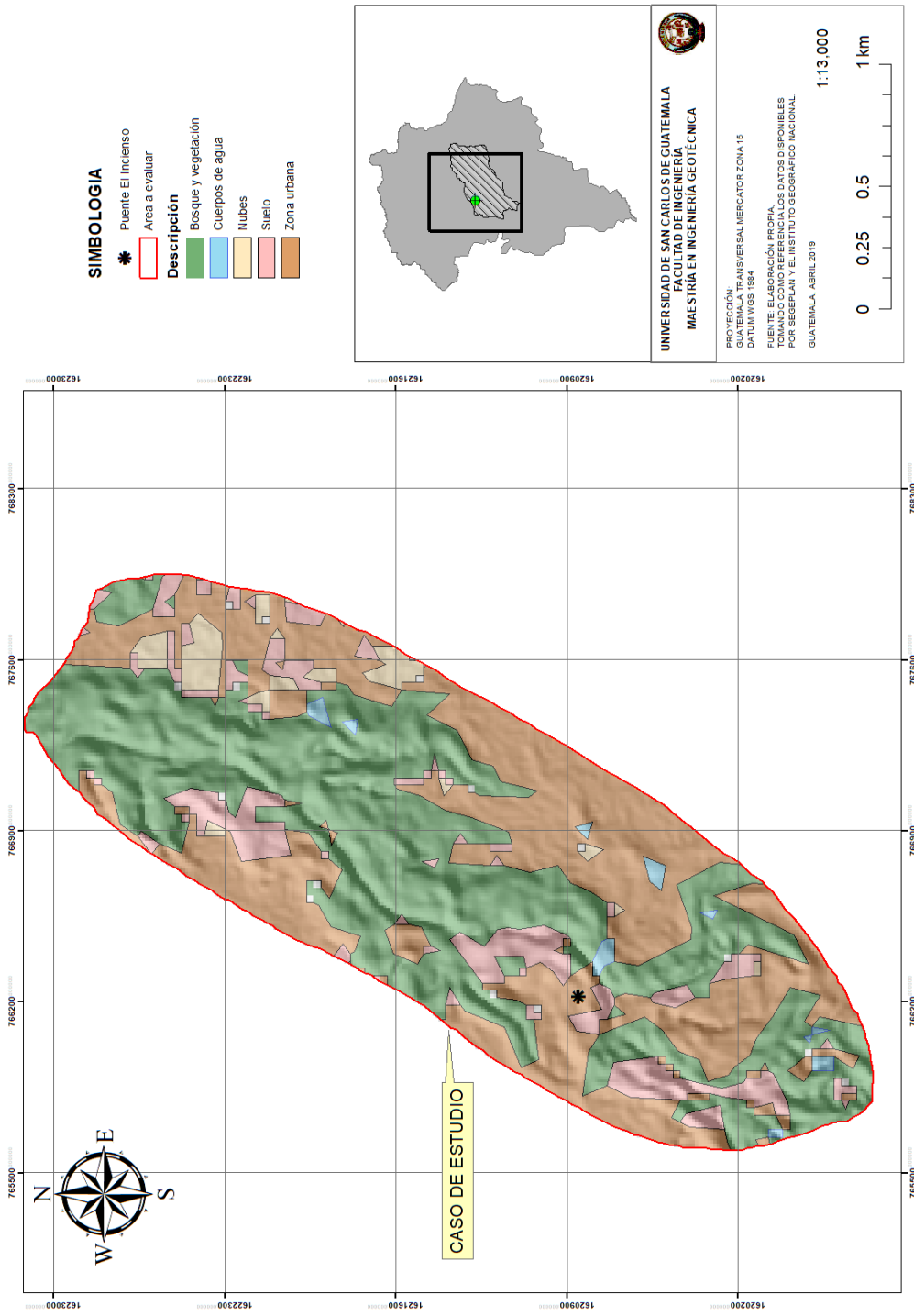
Tabla XXIV. **Porcentaje de las áreas, alrededor del puente El Incienso**

| Descripción | Tasa de cambio período 2009- 2018 |
|----------------------------|--|
| Nubes | -0.52 % |
| Bosque y vegetación | -0.89 % |
| Cuerpos de agua | 6.13 % |
| Suelo | -0.17 % |
| Zona urbana | 0.78 % |

Fuente: elaboración propia.

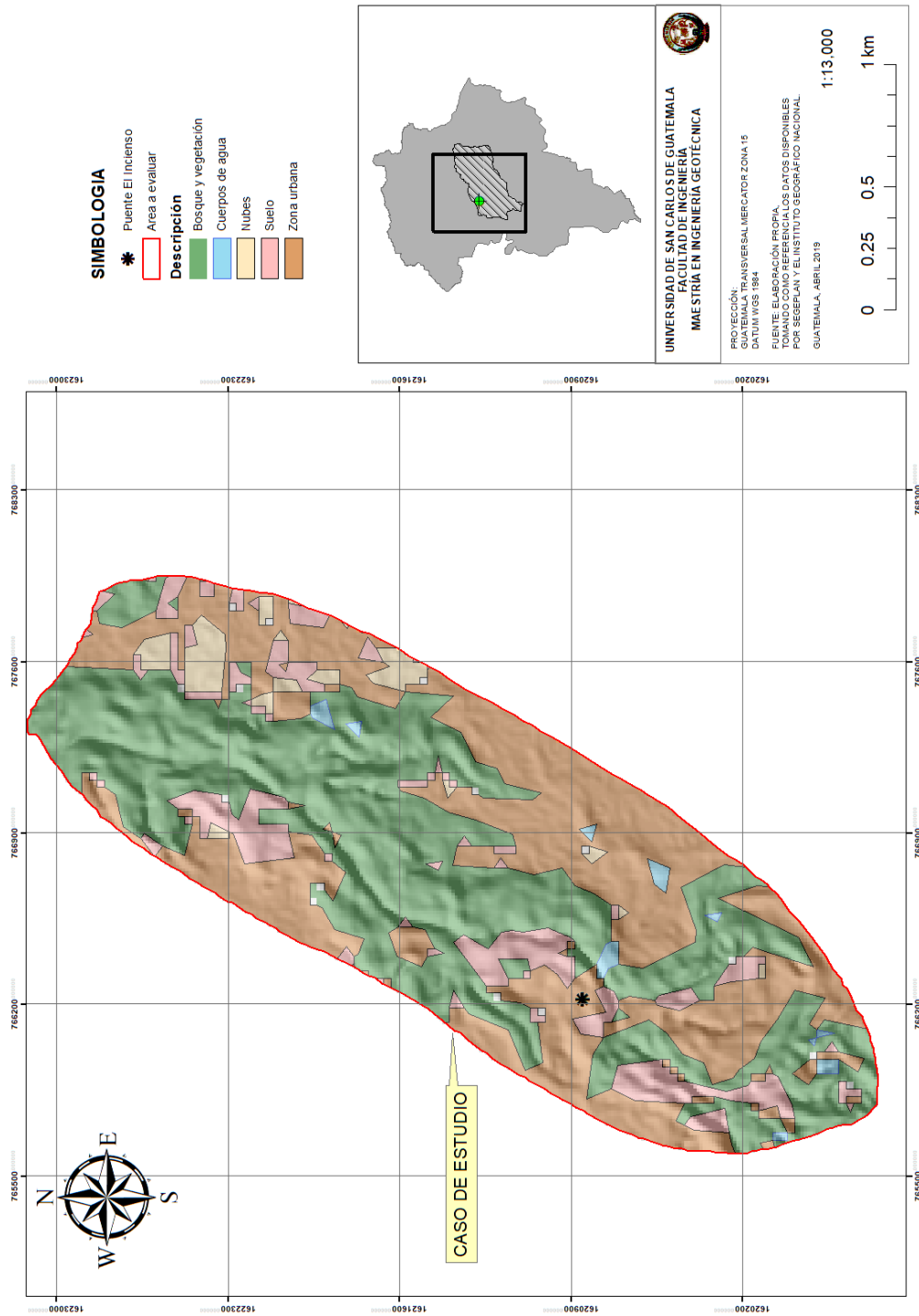
En los mapas a continuación se representa en imagen vector, el análisis multitemporal para la ciudad de Guatemala, para posterior, hacer su comparación y con el caso de estudio, empleando los sensores remotos Landsat 7 y 8 respectivamente.

Figura 65. Procesamiento imagen digital caso de estudio, Landsat
7 año 2009



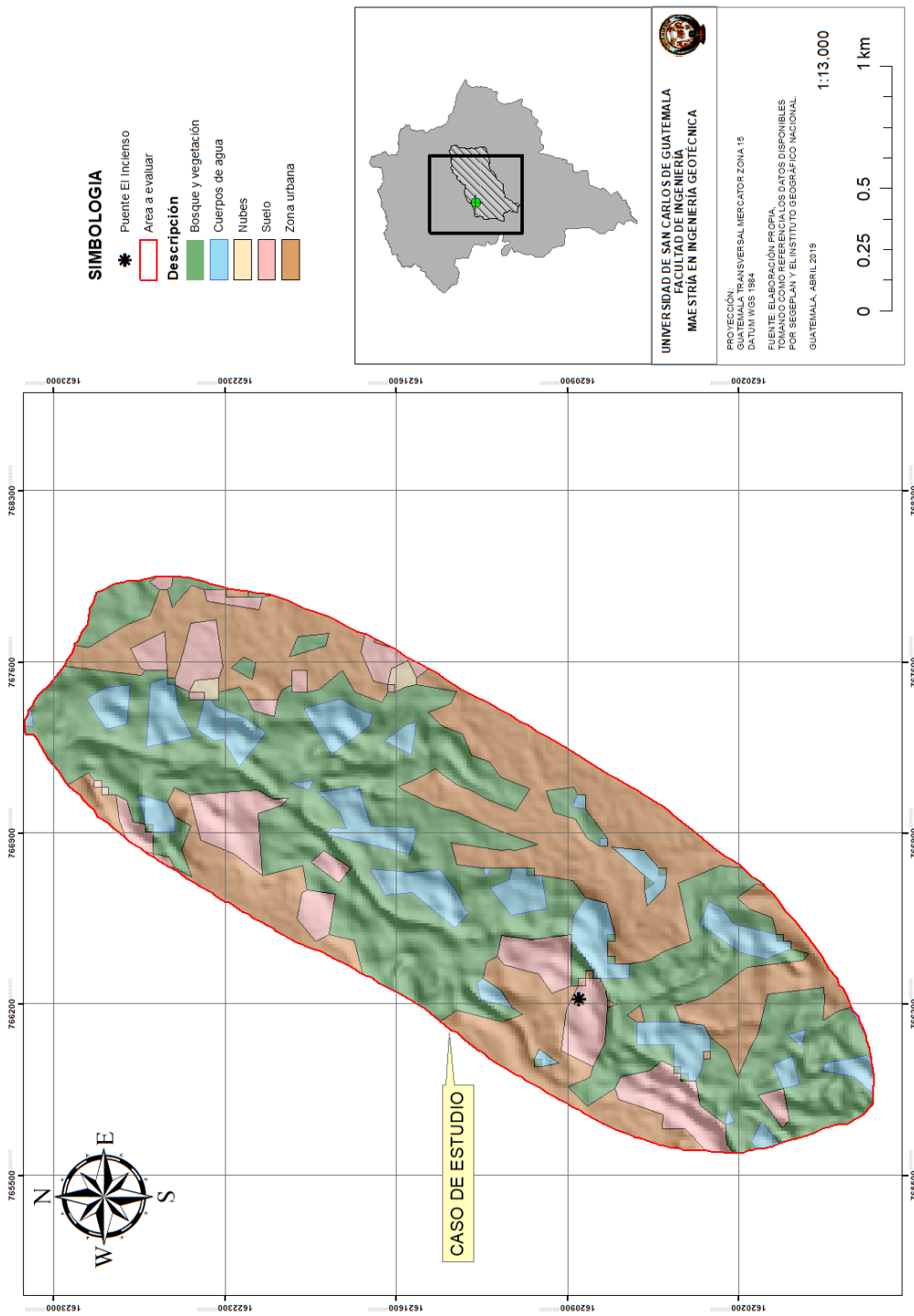
Fuente: elaboración propia.

Figura 66. **Procesamiento imagen digital caso de estudio, Landsat 7 año 2010**



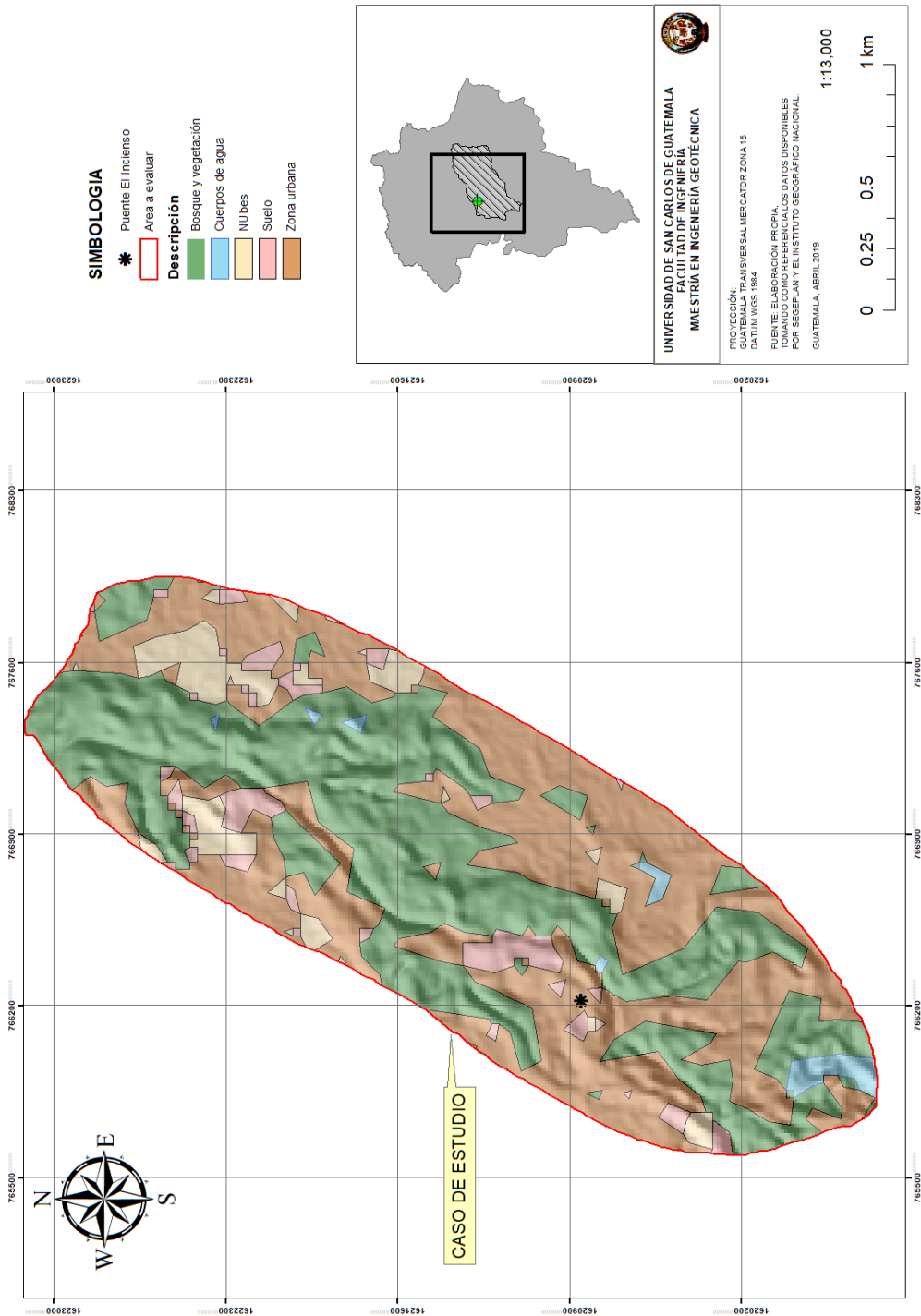
Fuente: elaboración propia.

Figura 67. Procesamiento imagen digital caso de estudio, Landsat 7 año 2011



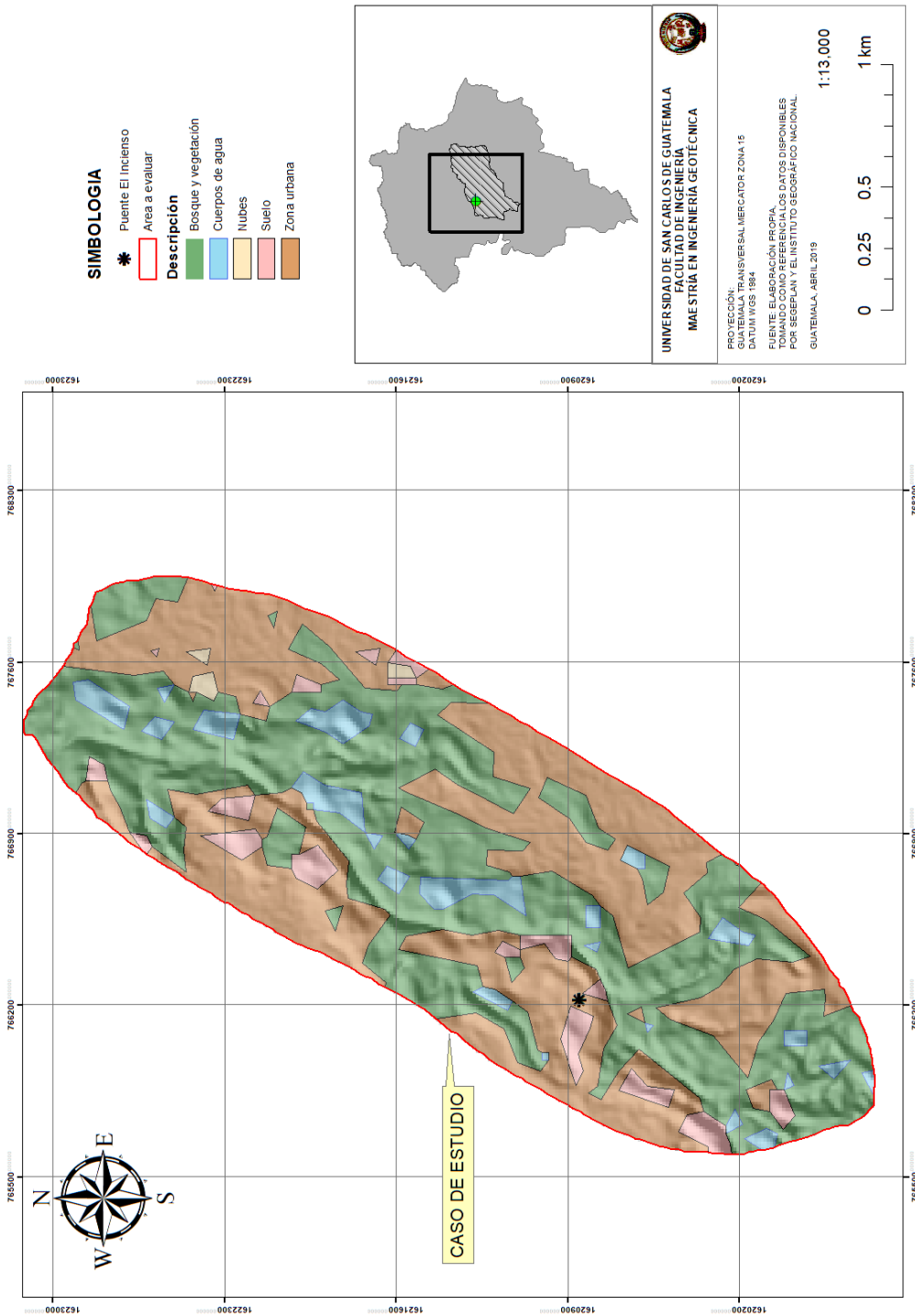
Fuente: elaboración propia.

Figura 68. **Procesamiento imagen digital caso de estudio, Landsat 7 año 2012**



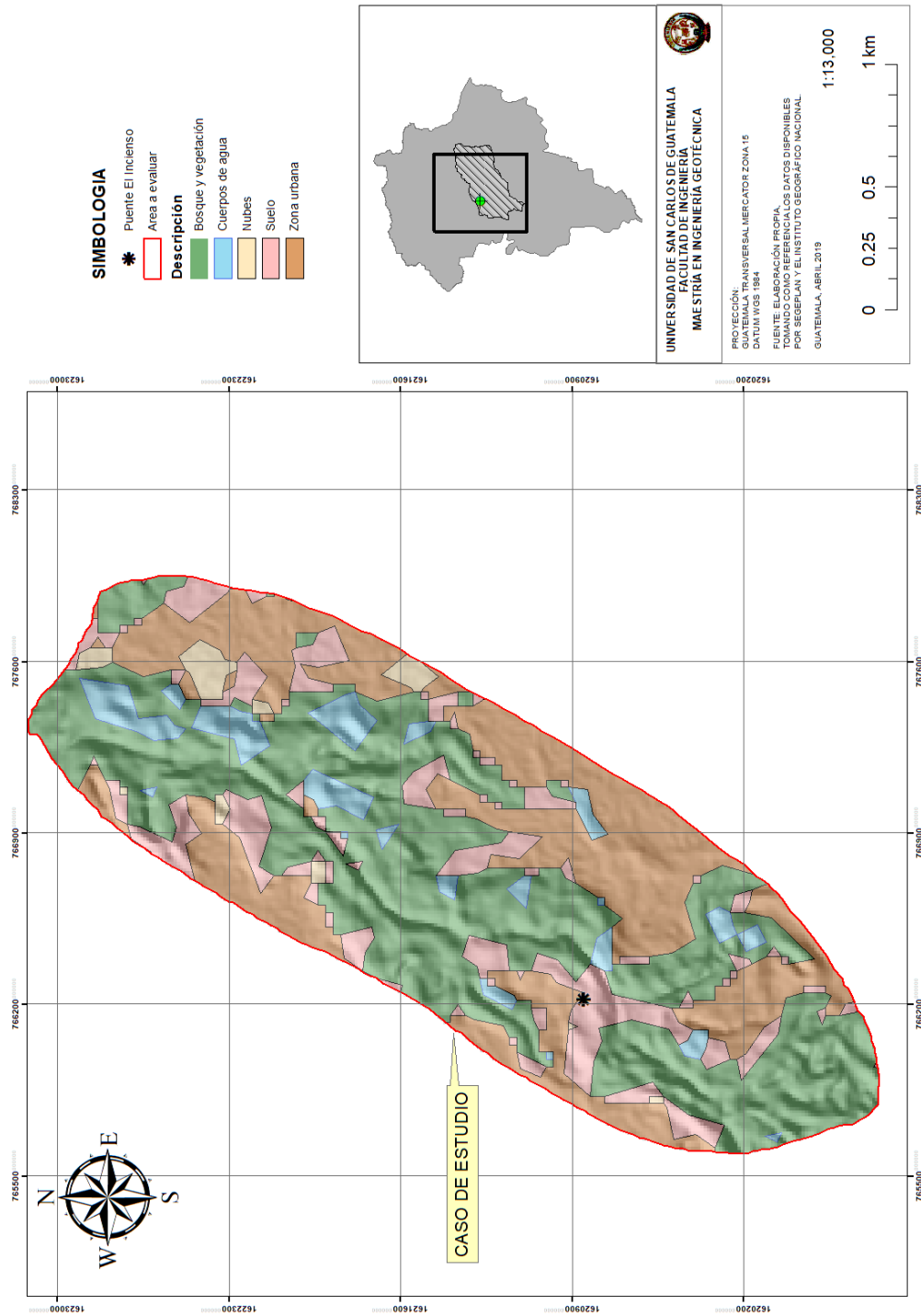
Fuente: elaboración propia.

Figura 69. Procesamiento imagen digital caso de estudio, Landsat 7 año 2013



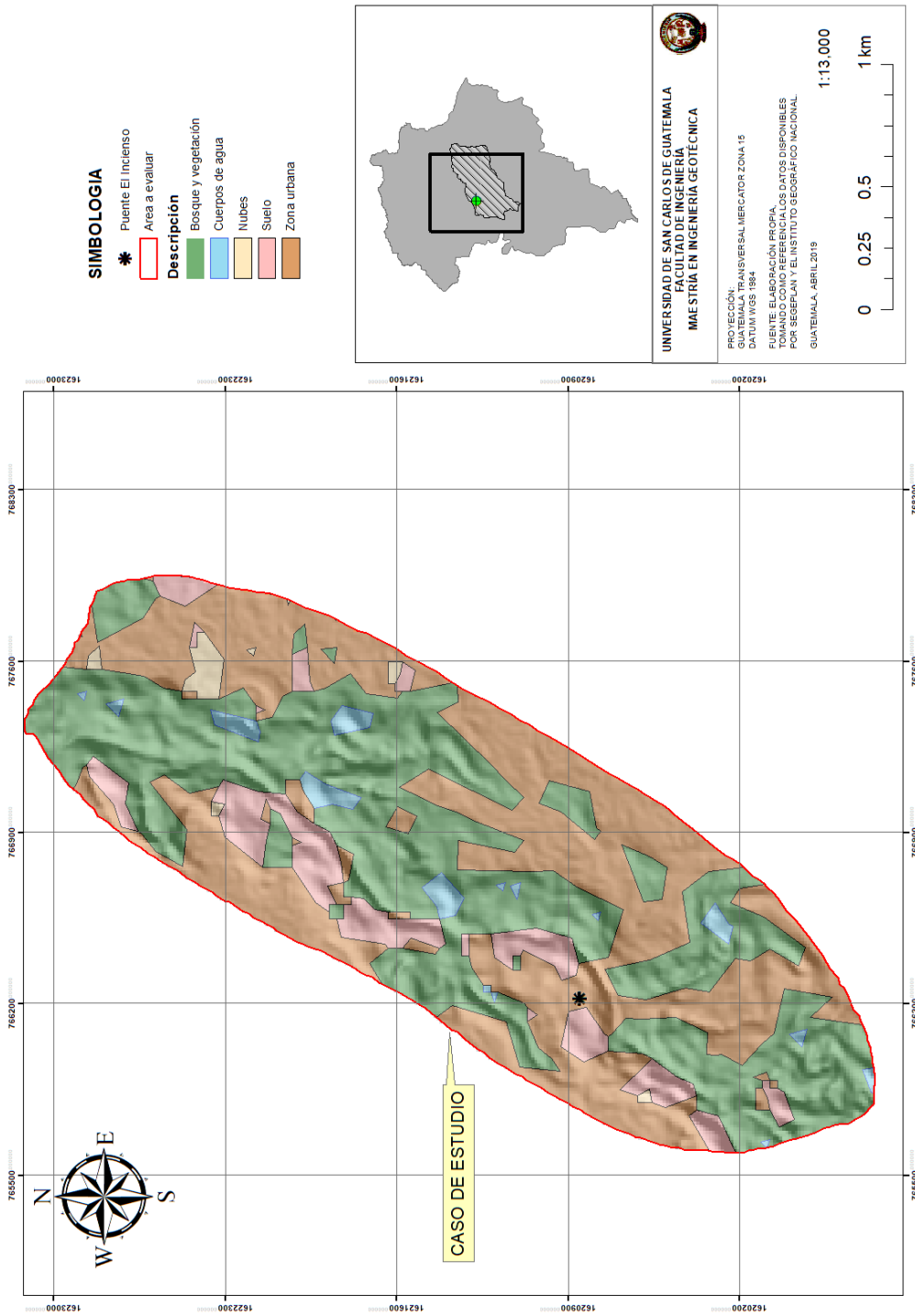
Fuente: elaboración propia.

Figura 70. Procesamiento imagen digital caso de estudio, Landsat 8 año 2014



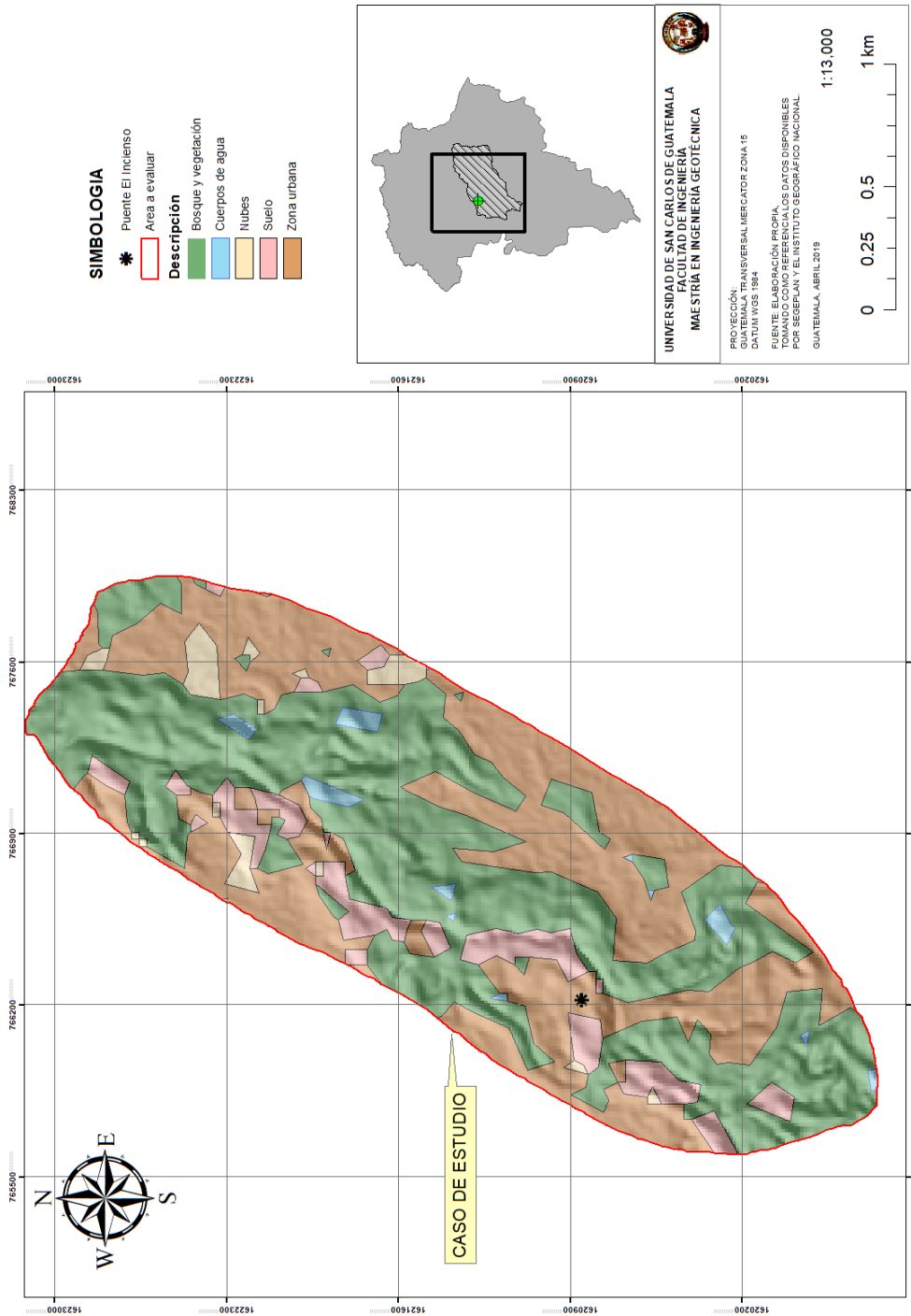
Fuente: elaboración propia.

Figura 71. Procesamiento imagen digital caso de estudio, Landsat 8 año 2015



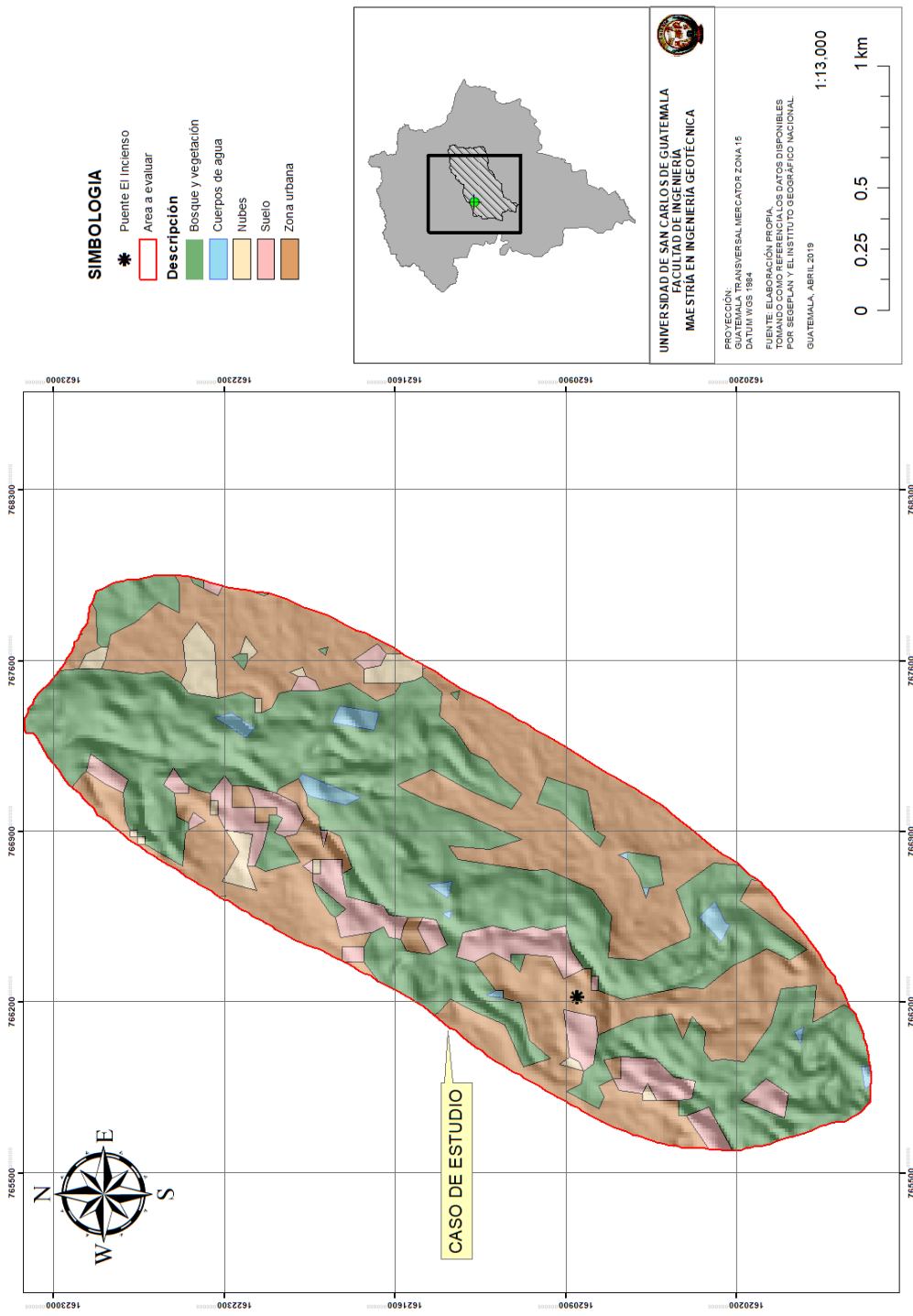
Fuente: elaboración propia.

Figura 72. Procesamiento imagen digital caso de estudio, Landsat 8 año 2017



Fuente: elaboración propia.

Figura 73. Procesamiento imagen digital caso de estudio, Landsat 8 año 2018



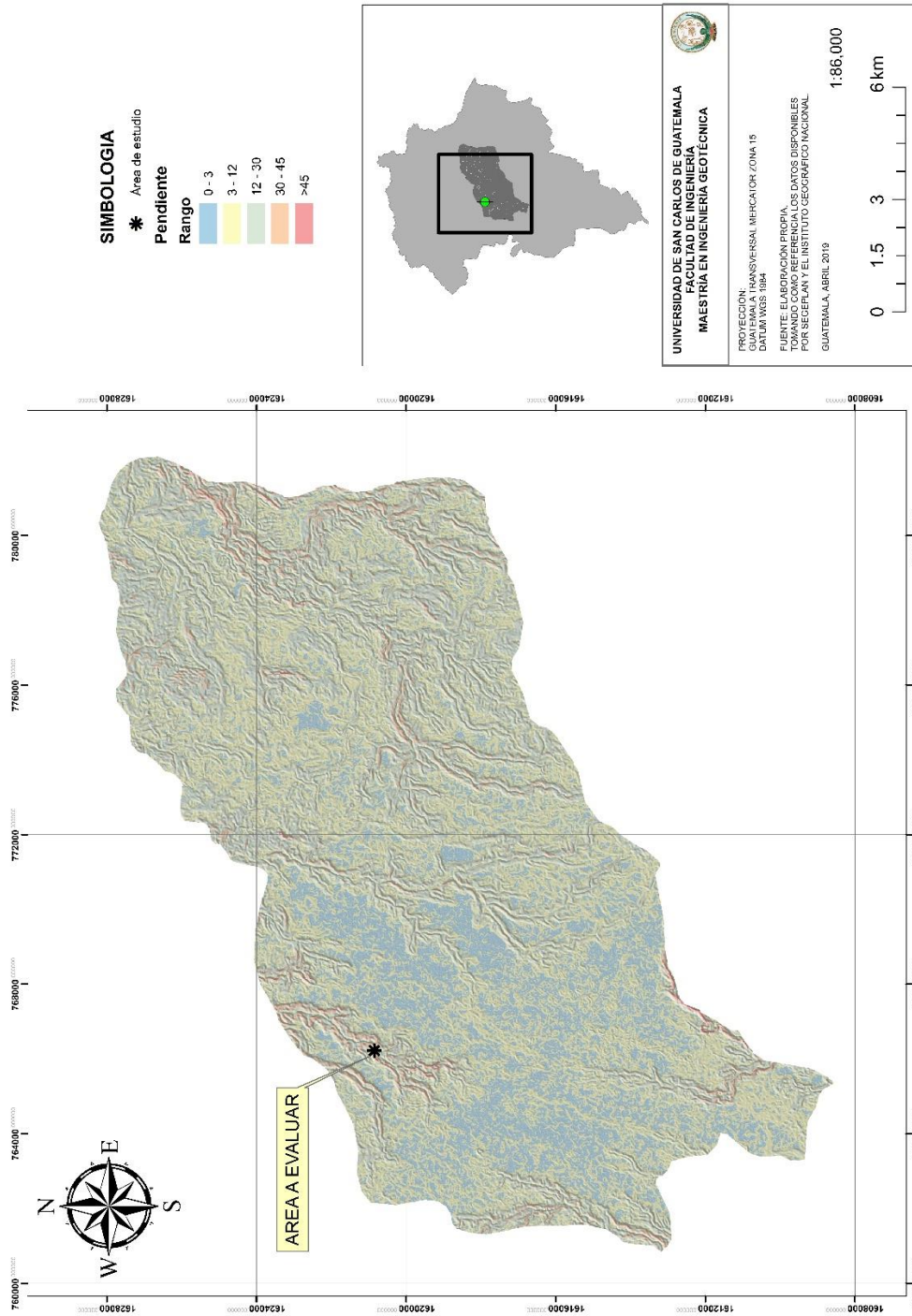
Fuente: elaboración propia.

3.1.2. Generación de DEM de mapa de pendientes

Para el análisis de pendientes, se empleó un DEM con una resolución de píxel de doce metros, esto se obtuvo del sensor remoto ALOS PALSAR (EARTHDATA, 2019), empleando las herramientas de Arcgis. Para procesar la imagen digital se presenta una delimitación para la Ciudad de Guatemala. Esta información previamente procesada y clasificada, se compara con la información generada por la Conred y con ello, validar la correlación de datos obtenidos.

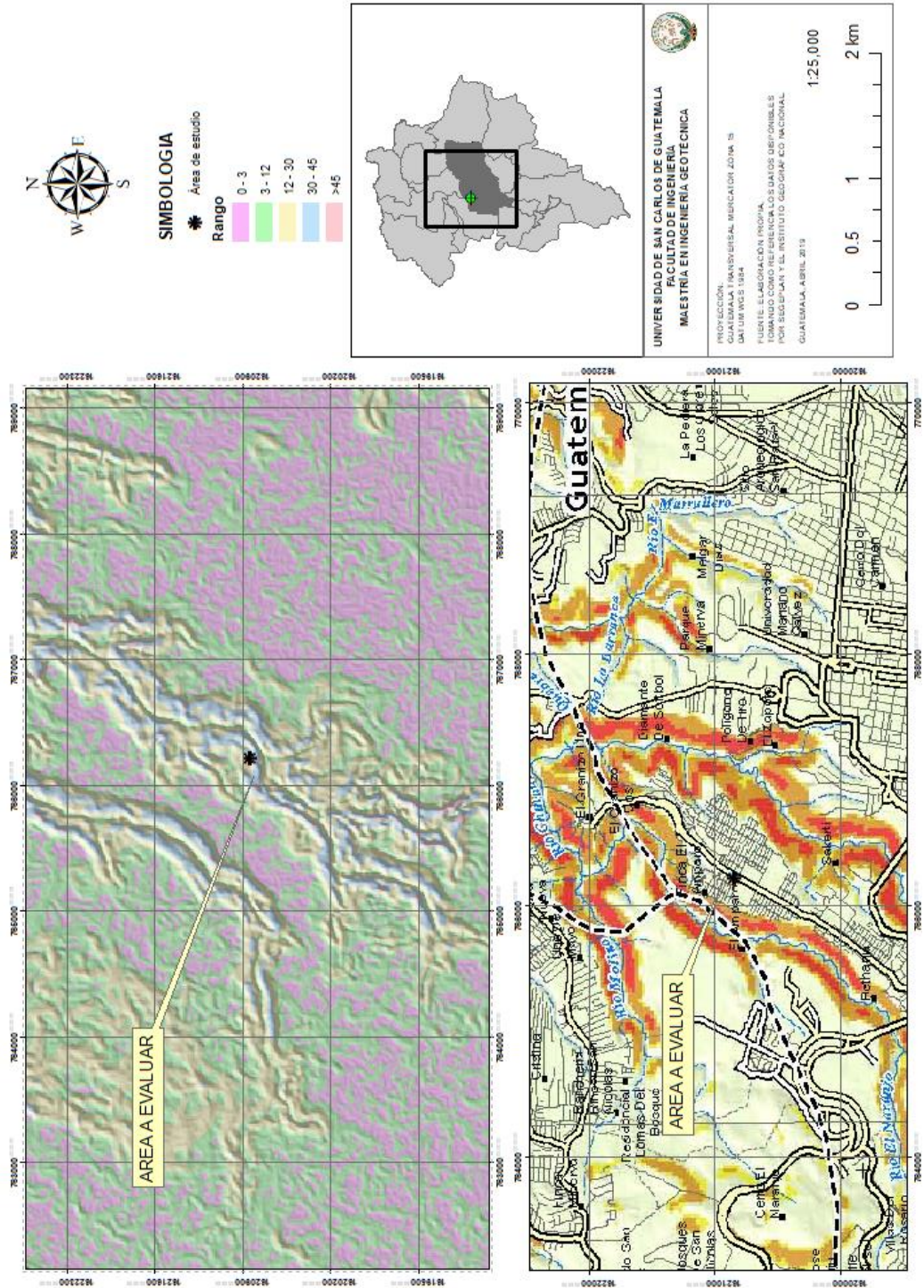
En la generación de este tipo de mapas, es importante hacer la correlación de la clasificación del cambio y uso de suelo, con ello se complementará con la metodología de Mora – Vahrson, para su correcta interpretación en el modelo digital del caso de estudio.

Figura 74. Mapa de pendiente generado con un DEM de 12 m de resolución



Fuente: elaboración propia.

Figura 75. Comparación mapa de pendientes (superior) versus mapa generado por Conred (inferior)



Fuente: elaboración propia.

A continuación, se muestra los valores de pendientes para la ciudad de Guatemala, empleando la metodología para su clasificación (Lugo Hobp, 1988). Por medio de sus trabajos, reconoce seis clases de unidades litológicas ante eventos de prevención a deslizamientos.

Tabla XXV. **Clasificación de pendientes para la ciudad de Guatemala**

| Rango de pendientes | | | |
|--------------------------------|------------------|-----------------------------|-----------------------|
| Clasificación | Rango (%) | Área (m²) | Porcentaje (%) |
| Plano (planicie) | 0 -3 | 43108369.52 | 20.04702 |
| Ligeramente inclinado | 3 – 12 | 67059639.78 | 31.18526 |
| Moderadamente inclinada | 12 – 30 | 94886047.07 | 44.12559 |
| Fuertemente inclinada | 30 - 45 | 9464180.70 | 4.401201 |
| Caída libre | > 45 | 518096.0291 | 0.240934 |

Fuente: elaboración propia.

En la tabla XXVI se observa que se exponen valores con un riesgo a deslizamientos cuando las pendientes se encuentran mayor a un doce por ciento, ocupan un treinta y seis por ciento en la zona de influencia, en menor proporción se clasifican en caída libre, en cuya mayoría pertenecen a la zona que estará bajo un análisis geotécnico.

Tabla XXVI. **Clasificación de pendiente para el área de influencia**

| Rango de pendientes | | | |
|--------------------------------|------------------|-----------------------------|-----------------------|
| Clasificación | Rango (%) | Área (m²) | Porcentaje (%) |
| Plano (planicie) | 0 -3 | 532173.07 | 13.05 |
| Ligeramente inclinado | 3 – 12 | 1194372.31 | 29.29 |
| Moderadamente inclinada | 12 – 30 | 1502955.75 | 36.86 |
| Fuertemente inclinada | 30 - 45 | 787862.92 | 19.32 |
| Cáida libre | > 45 | 59436.80 | 1.45 |

Fuente: elaboración propia.

3.2. Resultados de la aplicación del método de Mora-Vahrson

Obtenido los valores de susceptibilidad, se lleva a cabo la integración para la correcta interpretación del modelo de Mora-Vahrson y su clasificación del grado de susceptibilidad, según lo descrito en la tabla XIX.

Tabla XXVII. Resultados Mora – Vahrson

| Descripción | Rango | SI | Sh | Sp | EP | Ds | DII | D | Susceptibilidad | Susceptibilidad | Grado de | Rango de valores |
|---------------------|---------|----|----|----|----|----|-----|---|---------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|------------------|
| | | | | | | | | | al deslizamiento por sismicidad | al deslizamiento por lluvia | susceptibilidad al deslizamiento | |
| Bosque y vegetación | >45 | 3 | 3 | 6 | 54 | 6 | 3 | 9 | 324 | 162 | 486 | Alta |
| Bosque y vegetación | 0 - 3 | 3 | 3 | 1 | 9 | 6 | 3 | 9 | 54 | 27 | 81 | Moderado |
| Bosque y vegetación | 12 - 30 | 3 | 3 | 4 | 36 | 6 | 3 | 9 | 216 | 108 | 324 | Alta |
| Bosque y vegetación | 3 - 12 | 3 | 3 | 3 | 27 | 6 | 3 | 9 | 162 | 81 | 243 | Alta |
| Bosque y vegetación | 30 - 45 | 3 | 3 | 5 | 45 | 6 | 3 | 9 | 270 | 135 | 405 | Alta |
| Cuerpos de agua | >45 | 3 | 3 | 6 | 54 | 6 | 3 | 9 | 324 | 162 | 486 | Alta |
| Cuerpos de agua | 12 - 30 | 3 | 3 | 4 | 36 | 6 | 3 | 9 | 216 | 108 | 324 | Alta |
| Cuerpos de agua | 3 - 12 | 3 | 3 | 3 | 27 | 6 | 3 | 9 | 162 | 81 | 243 | Alta |
| Cuerpos de agua | 30 - 45 | 3 | 3 | 5 | 45 | 6 | 3 | 9 | 270 | 135 | 405 | Alta |
| Suelo | >45 | 3 | 3 | 6 | 54 | 6 | 3 | 9 | 324 | 162 | 486 | Alta |
| Suelo | 0 - 3 | 3 | 3 | 1 | 9 | 6 | 3 | 9 | 54 | 27 | 81 | Moderado |
| Suelo | 12 - 30 | 3 | 3 | 4 | 36 | 6 | 3 | 9 | 216 | 108 | 324 | Alta |
| Suelo | 3 - 12 | 3 | 3 | 3 | 27 | 6 | 3 | 9 | 162 | 81 | 243 | Alta |
| Suelo | 30 - 45 | 3 | 3 | 5 | 45 | 6 | 3 | 9 | 270 | 135 | 405 | Alta |
| Zona urbana | >45 | 3 | 3 | 6 | 54 | 6 | 3 | 9 | 324 | 162 | 486 | Alta |
| Zona urbana | 0 - 3 | 3 | 3 | 1 | 9 | 6 | 3 | 9 | 54 | 27 | 81 | Moderado |
| Zona urbana | 12 - 30 | 3 | 3 | 4 | 36 | 6 | 3 | 9 | 216 | 108 | 324 | Alta |
| Zona urbana | 3 - 12 | 3 | 3 | 3 | 27 | 6 | 3 | 9 | 162 | 81 | 243 | Alta |
| Zona urbana | 30 - 45 | 3 | 3 | 5 | 45 | 6 | 3 | 9 | 270 | 135 | 405 | Alta |

Fuente: elaboración propia.

3.3. Emplazamiento

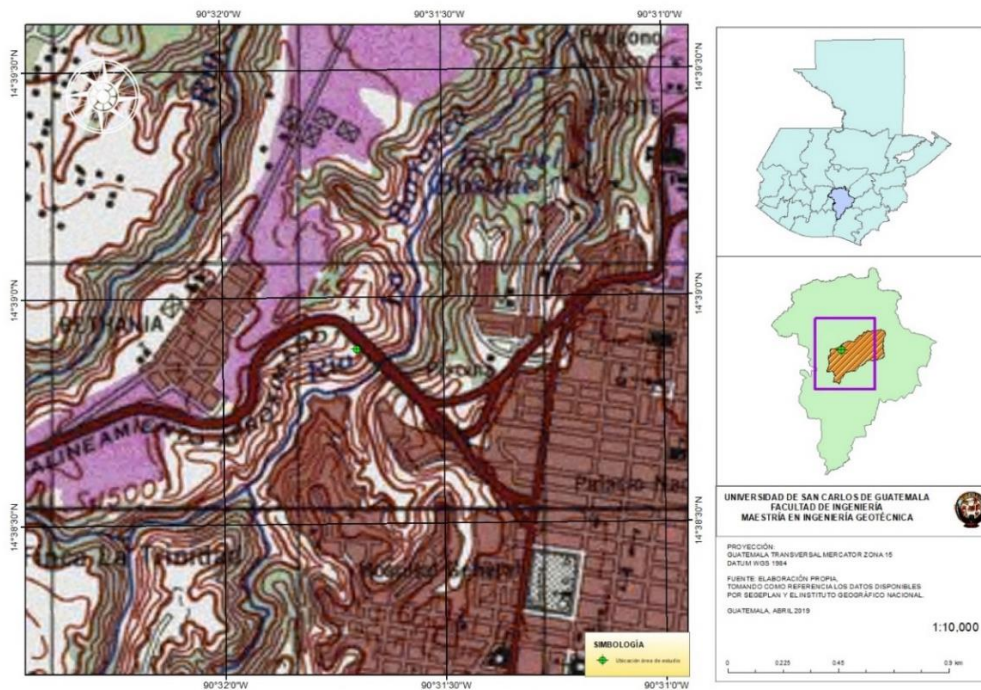
El área para la investigación se encuentra ubicado al noroeste con la ciudad de Guatemala, a continuación, se describen los criterios geotécnicos para su evaluación.

3.3.1. Localización del área de estudio

Para la identificación de la zona evaluar, se hace necesario hacer su representación, por medio de los sistemas de información, generando cartografía digital.

Figura 76. Mapa de localización El Incienso, ciudad de Guatemala

| Localización | Nombre | Coordenadas WGS 1984 |
|--------------|-------------|----------------------------------|
| 1 | El Incienso | 14°38'45.78" N 90°31'41.95" O |



Fuente: elaboración propia.

3.3.2. Geología en la colonia El Incienso

Entre las características geológicas de la zona de El Incienso es que se formó en la era Cenozoica, se desarrolló en el período Cuaternario, su composición geológica es Tephra interestratificada con diamictones pomáceos y sedimentos fluvio –lacustres, los materiales en el valle no se encuentran clasificados y sus cimbras son localmente estratificadas. El espesor de estos diamictones individuales es de cincuenta metros. En el área de influencia se encuentran fallas y fracturas evidenciadas por el terremoto de 1976. La información disponible fue elaborada por el Instituto Geográfico Nacional a una escala 1: 50,000 cuya referencia es la hoja 2059 I.

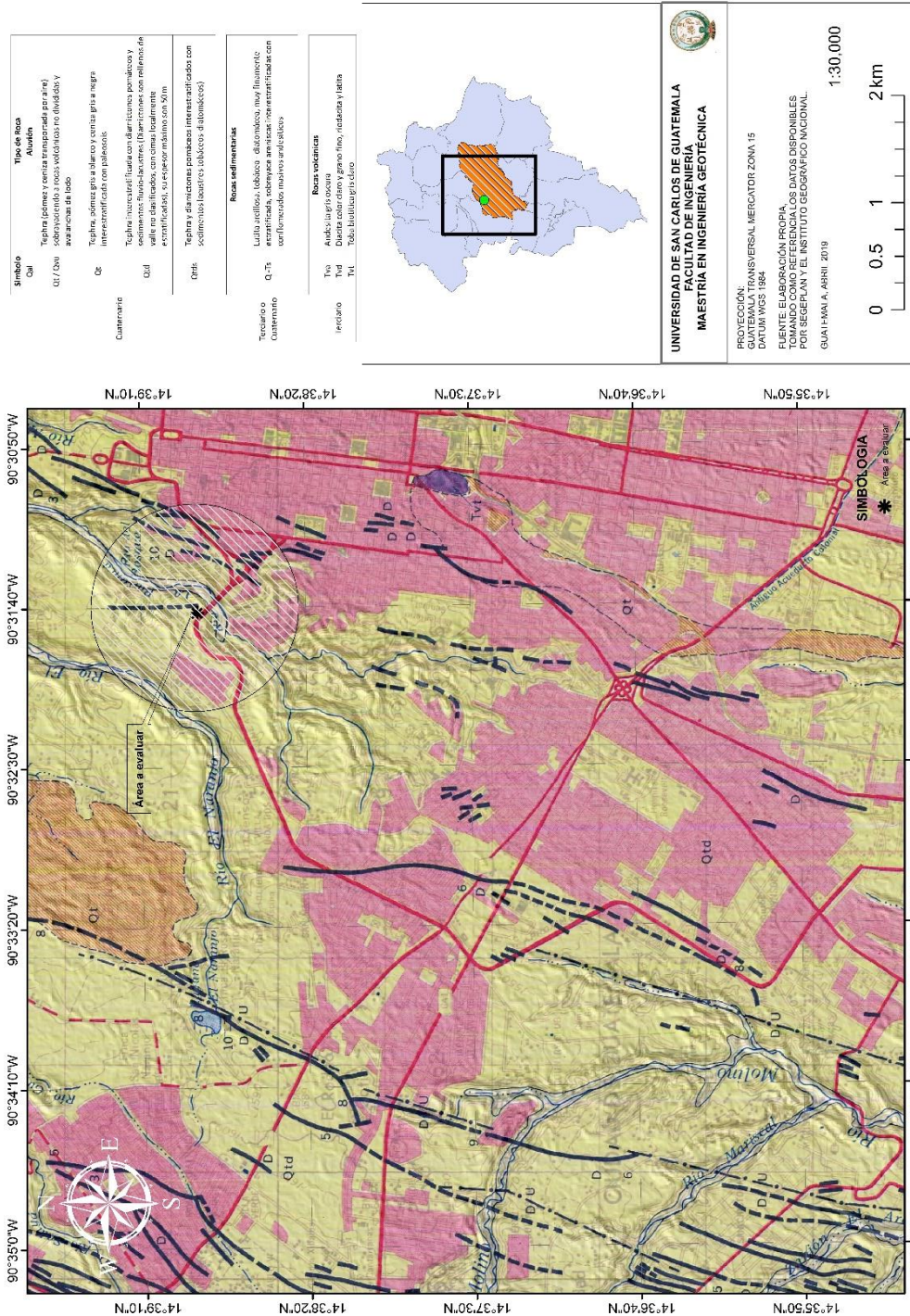
En algunos puntos de la zona de evaluación las rocas volcánicas que se pueden encontrar pertenecen al período Terciario, cuyas características son tobas biotítica de un gris claro.

Figura 77. Característica geológica cerca de la barranca El Incienso



Fuente: elaboración propia.

Figura 78. Mapa geológico ciudad de Guatemala



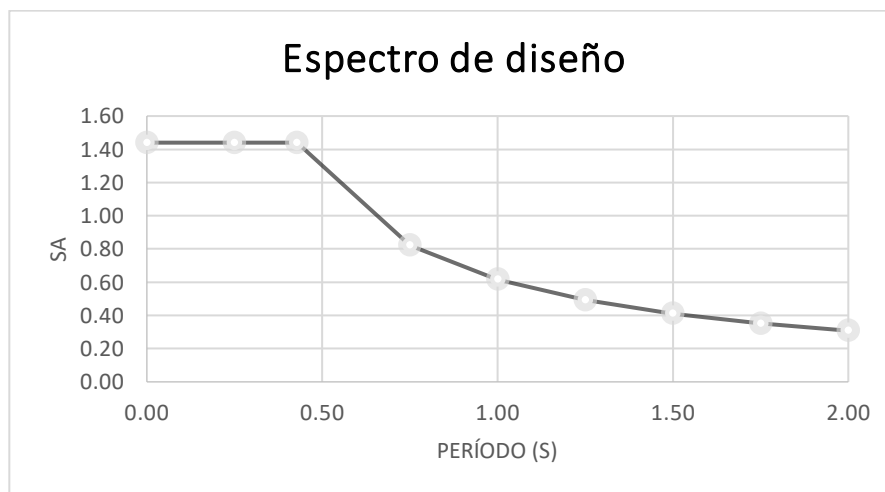
Fuente: IGN (1977). Mapa geológico de la ciudad de Guatemala, escala 1: 50,000 Hoja 2059 I

3.3.3. Índice de sismicidad para la zona El Incienso

Se empleó la clasificación para el análisis sísmico y se tomó como línea base la metodología descrita por Agies. En esta sección se eligieron los parámetros del dimensionamiento y los espectros sísmicos que sirven como lineamientos para análisis de taludes, considerando una obra de tipo importante.

Tabla XXVIII. Clasificación del sitio para el espectro sísmico

| Índice sismicidad y parámetro del sismo extremo | | | | | | |
|---|--|-----------|-----------|---------------|------------|-----------|
| Municipio | I_0 | $Scr (g)$ | $S1r (g)$ | Prob. Sismo % | | |
| Guatemala | 4.2 | 1.5 | 0.55 | 5 % | | |
| Ajuste por clase de sitio | | | | | | |
| Fa | Fv | $Scs (g)$ | | $S1s (g)$ | | |
| 1.2 | 1.4 | 1.8 | | 0.77 | | |
| Período de Transición | Factores para la construcción del espectro de diseño | | | | | |
| T_s | K_d | $Scd (g)$ | $S1d (g)$ | $Sa(T) (g)$ | $ASMd (g)$ | $Svd (g)$ |
| 0.428 | 0.8 | 1.44 | 0.616 | 1.44 | 0.576 | 0.2304 |



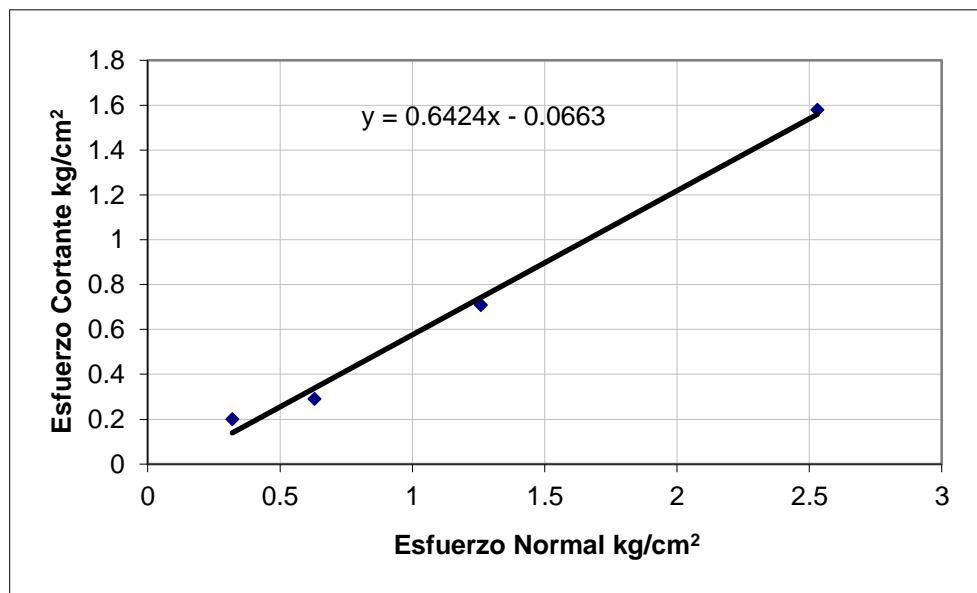
Fuente: Asociación Guatemalteca de Ingenieros Estructurales y Sísmica (2018). *Demandas Estructurales y Condiciones de Sitio.*

3.3.4. Corte directo de muestras en taludes sobre El Incienso

Para los resultados de corte directo, el tipo de ensayo fue no consolidado – no drenado, aplicando la metodología en la norma ASTM D-3080-04. Con un ángulo de fricción interna de 32.68° , cohesión de 0.66 t/m^2 y densidad húmeda de 0.56 T/m^3 .

Tabla XXIX. Ensayo de corte directo sobre talud

| σ | τ | Unidades |
|----------|--------|--------------------|
| 0.32 | 0.2 | kg/cm ² |
| 0.63 | 0.29 | kg/cm ² |
| 1.26 | 0.71 | kg/cm ² |



Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala (2019). *Adaptado del ensayo corte directo para determinación de ángulo de fricción interna, cohesión.*

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS MEDIANTE EL EMPLEO DE IMÁGENES SATELITALES

La topografía de la ciudad de Guatemala es irregular con pendientes pronunciadas. El desarrollo asociado a validar la vulnerabilidad ante deslizamientos por la expansión de la urbe es esencial para la investigación de los cambios ocurridos y usos del suelo, en un determinado espacio geográfico.

El uso del espacio multitemporal, sobre los distintos objetos y el comportamiento que ha sufrido la corteza terrestre, a través, de la reflectancia propia de los cuerpos, derivados de las imágenes generadas por los satelitales Landsat, permite emplear herramientas digitales para la identificación y representación en un plano cartográfico de las áreas susceptibles.

4.1. Resultados de las imágenes digitales

La Barranca El Incienso cuenta con un área superficial estimada de cuatro kilómetros cuadrados. Se analizaron los cambios ocurridos en los años 2009 a 2018 y se interpretaron los sensores Landsat 7 y 8, aplicando una supervisión clasificada y técnicas de estadísticas, para conocer la dinámica de los procesos ocurridos a través de mapas temáticos.

Cuando se realiza la clasificación supervisada, la obtención de las muestras tomando en consideración la firma espectral de la cubierta vegetal, es importante para su validación, la generación de una matriz de confusión para cada imagen analizada, proponiéndose cinco clases, pero a la vez aumentando su visibilidad con la altura sobre el nivel del mar y el porcentaje de nubes. En la

tabla IX, se presenta el resultado del coeficiente Kappa, el cual indica la exactitud de las clases elegidas, siendo este valor mucho más preciso, ya que se incluye dentro de su análisis todos los valores contenidos en la matriz, haciendo su interpretación de concordancia mayor a 0.90.

La clasificación de los valores de una matriz de confusión puede resultar no intuitiva, ya que, en las clases elegidas, los píxeles toman valores que no corresponden a los evaluados, dando como resultados a una mala clasificación si no se tiene el cuidado de observar cual es el grado de cobertura del área de estudio.

Tabla XXX. **Matriz de confusión**

| | Imágenes Landsat 7 y 8 | | | | | | | | | |
|---------------------------------|-------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Descripción | <i>2009</i> | <i>2010</i> | <i>2011</i> | <i>2012</i> | <i>2013</i> | <i>2014</i> | <i>2015</i> | <i>2016</i> | <i>2017</i> | <i>2018</i> |
| Precisión de píxeles (%) | 95.20 | 96.00 | 93.99 | 93.56 | 96.88 | 96.04 | 96.44 | 93.75 | 94.68 | 96.37 |
| Coeficiente Kappa | 0.93 | 0.94 | 0.90 | 0.89 | 0.93 | 0.92 | 0.95 | 0.89 | 0.92 | 0.94 |

Fuente: elaboración propia.

Aplicando la metodología para la tasa de cambio ocurrido, para el cambio y uso de suelo, en los diferentes años, el bosque y vegetación ha disminuido un 0.89 % esto debido a la creciente demográfica, como la expansión de la metrópoli en esa zona, el suelo se ha disminuido en un 0.17 % dando la interpretación de un crecimiento de cubierta vegetal o bien, expansión del área urbana, que asciende a un 0.78 % durante los períodos 2009 a 2018.

El aumento del suelo erosionado y reducción de los bosques en el área de influencia delimitada denota que deberán emplearse medidas de mitigación para el proceso de control de erosión. En las zonas cercanas al puente El Incienso, a un costado está una alcantarilla de drenaje pluvial, la cual es un canal abierto de concreto; pero por el crecimiento de la metrópoli alrededor de la zona, se le ha añadido la recolección de aguas residuales, esta cae directamente en el talud, sin ningún tipo de protección.

La figura 80 a continuación, se puede validar la información obtenida *in situ*. Las autoridades gubernamentales deben planificar un manejo adecuado de las aguas superficiales y controlar las construcciones que se realizan a orillas del relieve con pendientes pronunciadas. Así mismo, la falta de un tren de aseo ha convertido el río, en un transporte de los desechos sólidos, generando una contaminación de los cuerpos de agua superficiales, que desembocan al norte de la ciudad, pero dejando en su trayecto, enfermedades de origen hídrico.

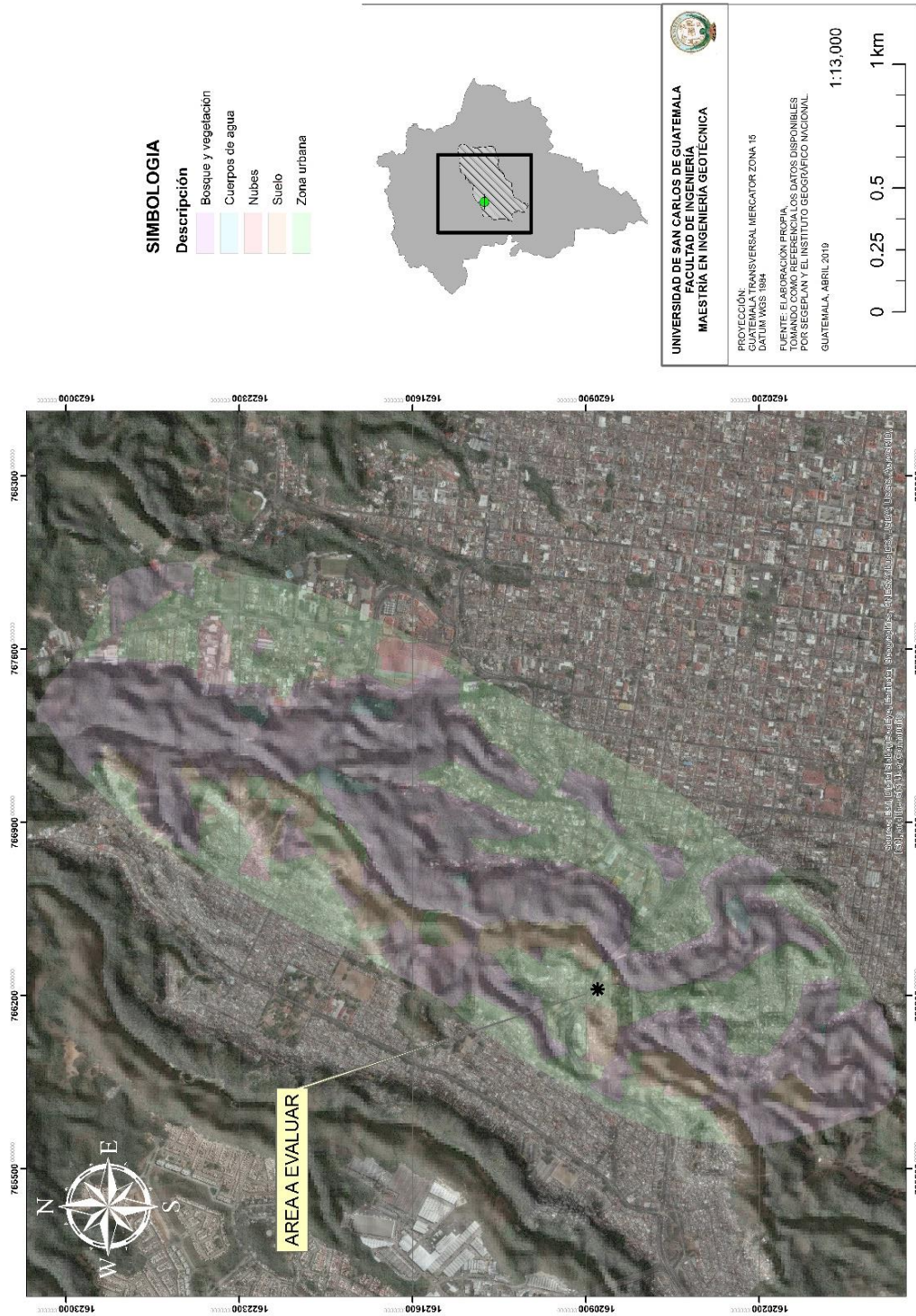
Figura 79. **Proceso erosivo a orillas del Puente El Incienso**



Fuente: elaboración propia.

En el mapa siguiente se analizan las distintas clases y la cobertura vegetal, se clasificaron por medio de imágenes a partir de sensores remotos. El acceso a esas áreas de difícil tránsito es permitido siempre se haga acompañar de un reconocimiento de campo, para hacer la correcta correlación de resultados obtenidos por las herramientas digital para su procesamiento.

Figura 80. Zona de evaluación barranca El Incienso



Fuente: elaboración propia.

El porcentaje de nubes para el año 2012 fue de un 40 % correspondiente al mes de marzo. Esto genera incertidumbre acerca de la cantidad de vegetación y zonas boscosas, por ello se analizaron imágenes de diferentes años, para concluir correctamente, según lo expuesto en la figura 57, pero la cobertura de suelo asciende a un porcentaje similar al de nubosidad. La zona urbana ha presentado un decrecimiento, tomando como referencia la primera imagen de Landsat analizada, pero a partir del año dos mil quince, la expansión ha sido considerable, esto teniendo cuenta que es en la parte noreste, del puente el Incienso, su expansión por asentamientos.

Al observar la figura 81, el manejo de la firma espectral, a través de las bandas y las clases seleccionadas en la clasificación supervisada, en diferentes tiempos con los datos generados de la teledetección, puede visualizarse esas texturas, causados por las diferentes condiciones atmosféricas; el análisis multitemporal permitirá determinar esos cambios significativos en el período estudiado.

4.2. Interpretación de Mora – Vahrson

Es una de las metodologías empleadas con mayor frecuencia en la región de Centroamérica, dado que, en su topografía, geología, pendientes pronunciadas y otros factores, se identifica las áreas con susceptibilidad a deslizamientos. Se ha comprobado que es una herramienta complementaria en la Ingeniería Geotécnica, para prospectar aquellos sitios latentes ante este tipo de fallas. Con ello se generan medidas de mitigación para salvaguardar vidas e infraestructuras, que se vuelvan económicamente factibles para su desarrollo.

Al aplicar la parametrización de los valores de clases de pendiente, la distribución natural de la forma del relieve se encuentra en un rango de 15 – 30 %, cuyas peculiaridades del terreno son pendientes moderadas a deslizamientos

ocasionales, el criterio seleccionado para su evaluación permite identificar no solo la distribución espacial de la pendiente y el ángulo de rompimiento de las partículas de suelo, sino los procesos fluviales y de remoción en masa observados de manera cualitativa. Los colectores municipales que descargan alrededor en los taludes de la barranca El Incienso hacen que el peligro de erosión sea severo, ya que no cuentan con obras de ingeniería para su protección.

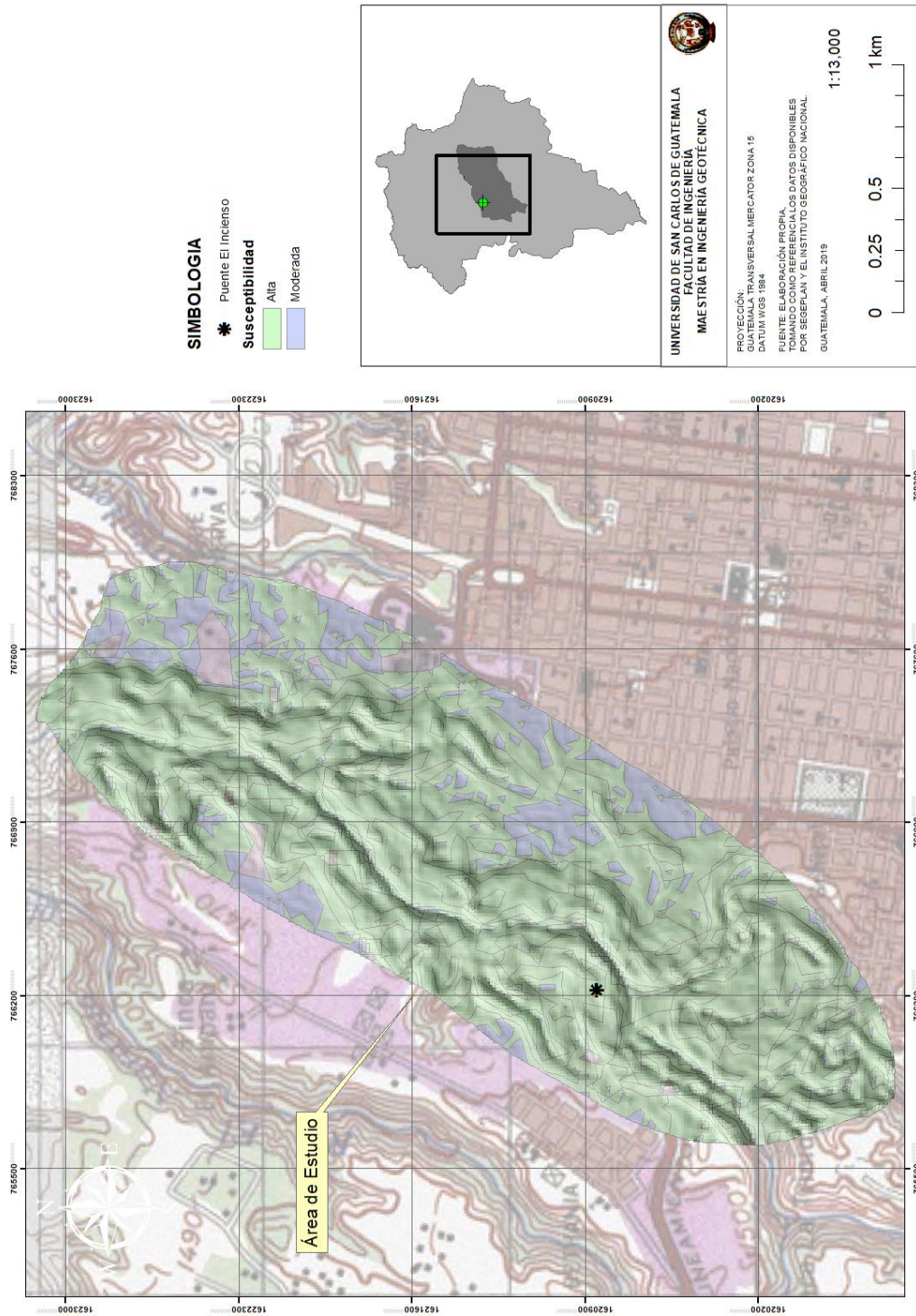
Los valores de lluvia considerando un tiempo de concentración de quince minutos, con un período de retorno de cien años, se tomó en consideración para su evaluación, aquellos resultados mayores a 250 mm/h, haciendo su clasificación en un valor de disparo de 3. Este resultado, corresponde a una categorización de precipitación en los meses de mayo a octubre, definiendo los valores ajustados de precipitación, aplicando la metodología de Mora – Vahrson.

Es importante, conocer los valores de disparo de sismicidad, es fundamental emplear los lineamientos para el cálculo del espectro sísmico, tomando como línea base, lo planteado por la Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica; según lo descrito en la tabla XXVI que es un $PGA = 5.39 \text{ m/s}^2$ cuya intensidad de Mercalli es VIII, con un grado de susceptibilidad elevado.

En el mapa de susceptibilidad, a continuación, se muestran los resultados obtenidos en la metodología de (Mora y Varson, 1994), haciendo la superposición sobre la hoja cartográfica 1524, generada por el Instituto Geográfico Nacional; dada a las condiciones geológicas de la zona, esta propensa a deslizamientos ocasionales. Por ello, deben evaluarse las construcciones cercanas a laderas, asegurando con ello, el correcto crecimiento urbano. En caso contrario, no deberá permitirse infraestructuras, si no se mejora las condiciones geotécnicas del sitio.

Este tipo de mapas es fundamental para tener un adecuado control de un ordenamiento territorial, la cual permite una restricción a zonas que sean latentes a deslizamientos, si no se cuenta con los estudios adecuados para su prevención. Las imágenes satelitales obtenidas de sensores remotos, para el caso de estudio son Landsat 7 y 8 respectivamente, se deriva una cartografía digital para identificar el cambio y uso de suelo, caracterizando las laderas que no estén afectadas ante un movimiento en masa, mediante una clasificación supervisada para su correcta interpretación.

Figura 81. Zona de susceptibilidad y clasificación al deslizamiento



Fuente: elaboración propia.

4.3. Interpretación de los ensayos de laboratorio para corte directo

Con la clasificación del sitio y fundamentándose en la norma NSE 2-20018, la designación de la barranca El Incienso, en su sección 4.3.1 este corresponde a perfiles de suelos firmes. Esto se establece con la inspección del sitio, las muestras extraídas, siendo las mismas, analizadas en laboratorio (ver anexo A y B). La estructura del relleno volcánica caracteriza el valle de Guatemala, que es definido principalmente por cenizas y arenas, se asientan sobre una superficie irregular, por lo que la comunidad científica acepta el modelo de Graben para interpretar geológicamente la Ciudad, siendo su origen por la tectónica de placas.

El suelo formado en el área de estudio es una composición de diamictones pomáceos y sedimentos, el ángulo de fricción interna se estima en 32.68° y densidad húmeda que varía en 0.50 a 0.95 T/m^3 respectivamente. Su interpretación en laboratorio y correlacionada *in situ* permiten afirmar que es una arena pómez limoso de color gris de cementación fuerte. En este tipo de material la cohesión es de 0.66 T/m^2 . Este valor es adecuado para la instalación de una infraestructura, pero si entra en contacto con el agua y no se protege adecuadamente, es susceptible a una erosión. Esto evidencia que, en los últimos años, el colapso de los colectores, líneas de descargas de afluentes sobre taludes y deforestación de la zona, ha originado un proceso erosivo y de deslizamientos, en la parte norte, donde se encuentra ubicado el puente El Incienso.

CONCLUSIONES

1. Para un periodo de diez años el cambio de uso de suelos, para la barranca El Incienso, realizando su procesamiento de la imagen digital mediante una clasificación supervisada, ha evidenciado una disminución del 0.89 % en la cobertura vegetal y un 0.17 % en suelo, pero por la creciente de la metrópoli, la zona urbana ha aumentado en un 0.78 % y los afluentes en un 6.13 %.
2. El análisis multitemporal de cambio y uso de suelos permiten implementar de mejor manera la metodología Mora – Vahrson, para definir las zonas susceptibles a deslizamientos.
3. De los resultados analizados en el laboratorio de las muestras obtenidas en taludes puede asegurarse que el suelo es una arena limosa color gris de cementación fuerte, con un ángulo de fricción interna de 24.75° y una cohesión de 41.19 Ton/m^2 . Pero por su formación geológica, es susceptible a erosión si no se implementan obras de ingeniería para su protección.

RECOMENDACIONES

1. Para la superposición y análisis multitemporales, se sugiere vectorizar las áreas que se estén analizando, clasificándose a través de herramientas digitales, a partir del manejo de las distintas bandas que contiene cada sensor remoto, sirviendo como un modelo base este estudio para implementarse para cualquier zona del país, identificando la susceptibilidad ante deslizamiento.
2. Cuando se esté empleando la metodología de Mora-Vahrson, es obligatorio complementar el aspecto sísmico con los datos generados por la Asociación Guatemalteca Estructural y Sísmica cuidando los aspectos geotécnicos de la zona que se esté analizando; así mismo, los datos de precipitación de tormenta máxima su data no deberá ser menor a diez años, para obtener las características reales del proyecto.
3. Los resultados de las muestras de suelos en laboratorio para que sean adaptados a las correcciones de las zonas susceptibles a deslizamientos deberán definirse de manera exhaustiva las actividades para el control y monitoreo, de los procesos de erosión que se expongan, atendiendo los lineamientos geotécnicos de los procesos constructivos y de mantenimiento, para que se desarrolle un correcto manejo de las aguas superficiales a través de obras de ingeniería.

REFERENCIAS

1. Air Drone View. (11 de noviembre de 2016). Sistemas de información geográfica. Recuperado de <https://airdroneview.com/2016/11/10/curso-gratuito-sistemas-de-informacion-geografica-gis/>
2. Aldana , A., & Bosque, j. (2008). *Cambios ocurridos en la cobertura/uso de la tierra del Parque Nacional Sierra de la Culata*. *Revista geográfica Venezolana*, 49(2), 173-200. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/40223849_Cartografia_d_e_la_coberturauso_de_la_tierra_del_Parque_Nacional_Sierra_de_La_Culata_estado_Merida-Venezuela
3. Aroche, J. (2 de noviembre de 2008). *El Puente El Incienso*. Recuperado de https://www.flickr.com/photos/j_aroche/3010150082/
4. ASIES. (1994). *Crecimiento histórico de la Ciudad de Guatemala*. Guatemala: Asociación de investigación y estudios sociales. Recuperado de <http://www.asies.org.gt/>
5. Asociación Guatemalteca de Ingenieros Estrcuturales y Sísmica. (2018). *Demandas estructurales y condiciones de sitio NSE*. Guatemala: AGIES. Recuperado de <https://www.agies.org/bibliotecas/>

6. Atkinson, P. (2005). *Geodinamycs* (Vols. ISBN 0-8493-2837-3). Florida, Estados Unidos: CRC. Recuperado de <https://vdocuments.site/geodynamics-5880cc1151cda.html>
7. Avilés, P. E., Milla Areneda, F., & Duarte, E. (2014). *Análisis multitemporal período 2000 -2010 para el humedal nacional Térraba-Sierpe y su área de influencia*. Costa Rica: Cooperación Alemana. Recuperado de <http://reddcr.go.cr>
8. Bense, Q. T. (1 de noviembre de 2007). *TELEDET*. Uruguay: Teledet. Recuperado de <http://www.teledet.com.uy/tutorial-imagenes-satelitales/filtrado-espacial.htm>.
9. Bonis, L. (1969). A summary of the Geology of Guatemala. *Publicaciones Geológicas del ICAITI*, 76-80. Recuperado de <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1747-5457.1980.tb01003.x>
10. Camacho Sanabria, J. M., Juan Pérez, J., Pineda Jaimes, N. B., Cadena Vargas, E. G., Bravo Peña, L. C., & Sánchez López, M. (Agosto de 2015). Análisis jerárquico de la intensidad de cambio de cobertura/uso de suelo y deforestación (2000-2008) en la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán, México. *Madera y Bosques*, 93-112. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/mb/v21n1/v21n1a8.pdf>

11. Cardona, O. D. (1996). Manejo ambiental y prevención de desastres: dos temas asociados. En *Ciudades en Riesgo*. Quito, Ecuador: USAID. Recuperado de http://www.desenredando.org/public/libros/1996/cer/CER_cap04-MAYPD_ene-7-2003.pdf
12. Chavarría Espinoza, M. E. (2008). Taller Regional Cartografía Censal en América Latina para la ronda de los censos 2010. En INEGI (Ed.), *Uso de imágenes satélite en la ronda censal 2010 en México* (pág. 32). Santiago de Chile: INEGI. Recuperado de https://unstats.un.org/unsd/demographic/meetings/wshops/Chile_24Nov08/docs/Countries/Session_6-Mexico.ppt
13. Chuvieco, E. (1996). *Fundamentos de teledetección espacial*. Madrid: Rialp. Recuperado de <http://pdfhumanidades.com/sites/default/files/apuntes/FUNDAMENTOS-DE-TELEDETECCION-EMILIO-CHUVIECO.pdf>
14. Condori Luna, I. J., Loza Murguía, M. G., Mamanti Pati, F., & Solís Valdivia, H. (1 de mayo de 2016). Análisis multitemporal de la cobertura boscosa empleando la metodología de teledetección espacial y SIG en la sub-cuenca del río Coroico - provincia Caranavi en los años 1989 – 2014. (U. C. Pablo, Ed.) *Scielo*, 9(1). Recuperado de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2072-92942018000100003

15. Cordero, V. (2000). *Breve diagnóstico de las áreas más expuestas a fenómenos naturales y sus características*. República Dominicana: Secretariado Técnico de la Presidencia. Recuperado de <http://eird.org/deslizamientos/pdf/spa/doc15074/doc15074-contenido.pdf>
16. De Diego, H. (2010). *Tratamiento digital de imágenes de teledetección en el espacio óptico para el reconocimiento y control de deslizamientos*. Universidad de Cardiff, Department of Computer Science. Italia: Ispra. Recuperado de https://users.cs.cf.ac.uk/Paul.Rosin/resources/papers/Hervas_y_Rosin.pdf
17. De León Mata, G. D., Pinedo Álvarez, A., & Martínez Guerrero, J. H. (2013). Aplicación de sensores remotos en el análisis de la fragmentación del paisaje en Cuchillas de la Zarca, México. *IG UNAM*, 12. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112014000200005
18. De León, R. G. (2013). *Manual para la elaboración de mapas de vulnerabilidad a deslizamientos y sequías utilizando como herramientas sistemas de información geográfica*. (tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala: Facultad de Agronomía. Recuperado de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/6212/>

19. Deguate. (31 de octubre de 2017). *Asentamientos precarios en la ciudad de Guatemala*. (A. d. (ASIES), Editor) Recuperado de https://www.deguate.com/artman/publish/bienesraices_actualidad/asentamientos-precarios-en-la-ciudad-de-guatemala.shtml
20. Dengo, G. (1985). *Mid America: tectonic setting for the Pacific Margin from Southern Mexico to Northwestern Colombia* (Vol. 7). *The Oceans Basins and Margins*. Recuperado de <https://www.springer.com/gp/book/9780306377778>
21. Desarrollo, Programa Delnet de Apoyo al Desarrollo Local. (2010-2011). *Marco teórico y glosario curso de reducción del riesgo de desastres y desarrollo local sostenible*. CIF-OIT. Recuperado de http://www.bioculturaldiversityandterritory.org/documenti/318_300000176_a9711235_sp_folletoriesgo_nueva_fecha.pdf
22. EARTHDATA. (2019). *UAF, Alaska Satellite Facility*. Recuperado de <https://vertex-retired.daac.asf.alaska.edu/#>
23. Espinosa, M. R. (2008). *Uso de imágenes satélite en la ronda censal 2010 en México*. Santiago de Chile: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado de https://unstats.un.org/unsd/demographic/meetings/wshops/Chile_24Nov08/docs/Countries/Session_6-Mexico.ppt
24. ESRI. (2016). *Arcgis Desktop 10.5. 1999-2016*. Estados Unidos. Recuperado de <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/>

25. Estrada, N. (2017). *Landside susceptibility prediction in a mountainous catchment the Naranjo Basin, Western Guatemala*. University Liege. Liege: Faculty of Sciences Department of Geography. Recuperado de <https://orbi.uliege.be/handle/2268/212996>
26. FAO. (22 de junio de 2019). *Portal de suelos de la FAO*. Recuperado de <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/mapas-historicos-de-suelos-y-bases-de-datos/mapa-mundial-de-suelos-de-faunesco/es/>
27. Ferrando, F. (mayo de 2003). En torno a los desastres naturales: tipología, conceptos y reflexiones. *Revista INVI*, 18(47). Recuperado de <http://www.revistainvi.uchile.cl/index.php/INVI/article/view/388/808>
28. Ferreli, F., & Bustos, M. (2015). Utilización de imágenes satelitales para el estudio de la distribución térmica en distintas coberturas del suelo de la ciudad de Bahía Blanca (Argentina). 12. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/158837948.pdf>
29. Gándara, J. L. (1993). Análisis de vulnerabilidad física para la prevención de desastres en la ciudad de Guatemala. En J. L. Gándara. Guatemala: Dirección General de Investigación –DIGI-. Recuperado de <https://digi.usac.edu.gt/bvirtual/informes/puiah/INF-2000-059.pdf>

30. García Varela, Á. (2010). *Landsat*. Documento desarrollado por Álvaro Varela. Recuperado de https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi8ml3-IK_gAhXHo1kKHcEJBXEQFjAAegQIBxAC&url=http%3A%2F%2Fkimerius.com%2Fapp%2Fdownload%2F5784863998%2FLANDSAT.pdf&usg=AOvVaw10UMgmtAC8qmMvAs0ZI-Vc
31. Geospatial. (14 de 6 de 2019). *Geoeye-1*. Recuperado de <http://geocento.es/galeria-de-satelites-para-buscar-y-adquirir-imagenes/satelite-imagenes-geoeye-1/>
32. González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. (P. Hall, Ed.) Madrid, España: Pearson Educación. Recuperado de <https://www.doccity.com/pt/gonzalez-de-vallejo-et-al-pearson-ingenieria-geologica/4802487/>
33. González Gómez, E. (2003). *Aspectos geomecánicos de los deslizamientos rápidos: modelización y diseño de estructuras de contención*. Universidad Politécnica de Madrid, Departamento de Ingeniería y Morfología del Terreno. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Recuperado de <http://oa.upm.es/242/1/04200327.pdf>
34. Guerrero, J. (9 de enero de 2011). *El blog de José Guerrero*. Recuperado de <https://joseguerreroa.wordpress.com/2010/10/11/analisis-de-componentes-principales-en-teledeteccion-autovalores-y-autovectores/>

35. Gúzman Ramírez, E. (2002). *Estudio geológico-geotécnico de la susceptibilidad de deslizamientos en la colonia El Carmen zona 12 de la ciudad de Guatemala*. Universidad de San Carlos de Guatemala, Escuela de Ingeniería Civil. Guatemala: Facultad de Ingeniería. Recuperado de <http://desastres.usac.edu.gt/documentos/docgt/pdf/spa/doc0043/doc0043.pdf>
36. Harris Geospatial. (7 de 12 de 2015). Modelamiento para imágenes digitales a partir de sensores remotos. *ENVI 5.3*. Estados Unidos. Recuperado de <https://www.harrisgeospatial.com>
37. Hernández Pardo, O. (2008). *Cartografía geológica y modelamiento estructural de las cuencas de Urabá y Sinú-San Jacinto a partir de la interpretación de imágenes de sensores remotos y monitoreo sísmico*. Universidad Nacional de Colombia, Departamento de geociencias. Bogotá: Facultad de Ciencias. Recuperado de http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Tesis/5_Informe_Final.pdf
38. Herrera, A., Fajardo, F., Cabrera, A., & Macz, A. (2000). *Los desastres naturales en las áreas precarias: pobreza y vulnerabilidad*. Universidad de San Carlos de Guatemala, Dirección General de Investigación DIGI. Guatemala: Centro de Estudios Urbanos y Regionales CEUR. Recuperado de <https://digi.usac.edu.gt/bvirtual/informes/puiah/INF-2000-059.pdf>

39. Hervás, J., & Rosin, P. (2001). *Tratamiento digital de imágenes de teledetección en el espectro óptico para el reconocimiento y control de deslizamientos*. Madrid: V Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. Recuperado de https://esdac.jrc.ec.europa.eu/Library/Themes/Landslides/Documents/Hervas_Rosin_2001_Madrid.pdf
40. Hord, R. (1982). *Digital Image Processing of Remotely Sensed Data*. New York: Academic Press. Recuperado de <https://www.elsevier.com/books/digital-image-processing-of-remotely-sensed-data/hord/978-0-12-355620-2>
41. IMASGAL. (2 de febrero de 2019). *Generación de mapas web temáticos a partir de arcgis*. Recuperado de <https://imasgal.com/generacion-mapas-web-tematicos-partir-arcgis/>
42. INEGI. (2017). *Geografía, Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Recuperado de <https://docplayer.es/62980323-Modelos-digitales-de-elevacion-mde-descripcion.html>
43. Ingeoexpert. (28 de diciembre de 2018). *Ingeoexpert*. Recuperado de <https://ingeoexpert.com/articulo/clasificaciones-de-imagenes-de-satelite/?v=cd6a9bd2a175>
44. INSIVUMEH. (24 de mayo de 2012). *Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología*. Recuperado de <http://www.insivumeh.gob.gt>

45. INSIVUMEH, IGN, ONU. (1978). Proyecto: Estudio de aguas subterráneas en Guatemala. En *Estudio de aguas subterráneas en Guatemala* (pág. 313). Guatemala: Ministerio de Comunicaciones y Obras Públicas. Recuperado de <https://funcagua.org.gt/wp-content/uploads/2020/04/1978.-Aguas-subterr%C3%A1neas-en-el-Valle-de-la-Ciudad-de-Guatemala.-INSIVUMEH-IGN-ONU.pdf>
46. Instituto Tecnológico Minero de España. (1987). *Manual de Taludes del Instituto Geológico y Minero de España (IGME)*. (F. Ayala Carcedo, Ed.) Madrid, España: ITGE. Recuperado de <https://enriquemontalar.com/manual-de-taludes-del-igme/>
47. Jensen, J. (1996). *Introductory Digital Image Processing*. New Jersey: Prentice Hall, Inc. Recuperado de [https://www.scirp.org/\(S\(351jmbntvnsjt1aadkposzje\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=2028387](https://www.scirp.org/(S(351jmbntvnsjt1aadkposzje))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=2028387)
48. Lambin, E. (1997). *Modelling and monitoring land-cover change process in tropical Regions. Progress in physical geography* (Vol. 21). Louvain-La-Neuve, Belgium: Research Article. Recuperado de <https://doi.org/10.1177/030913339702100303>
49. LATAM Satelital. (2 de marzo de 2016). *Latam Satelital*. Recuperado de <http://latamsatelital.com/destacada/page/23/>
50. Lillesand, T., & Kieffer, Y. (1994). *Remote Sensing and Image Interpretation* (Vol. 3ra. edición). Wiley & Sons, Inc.

51. López Duque, A. (2010). *Estimación de conflictos de uso de la tierra por dinámica de cultivos de palma africana, usando sensores remotos. Caso: Departamento del Cesar*. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas. Medellín: Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Recuperado de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/38047/538>
74
52. Lozada, E. (8 de marzo de 2017). *GEOPAISA*. (PAISA, Ed.). Recuperado el 7 de febrero de 2019, de <https://geopaisa.blog/2017/03/08/que-es-un-sig/>
53. Lugo Hobp, J. (1988). *Elementos de Gormorfología Aplicada: Métodos Cartográficos*. México: Instituto de Geografía. Recuperado de <http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/book/138>
54. Martín Edrosa, R. (2011). *Aplicación de la teledetección para el monitoreo de eventos hídricos superficiales mediante imágenes cosmo SkyMed*. Córdoba, Argentina: Universidad Nacional de Córdoba. Recuperado de https://ig.conae.unc.edu.ar/wp-content/uploads/sites/68/2017/08/2009_Edrosa-Rodrigo.pdf
55. Maskrey, A., & Lavell, A. (1993). *Los desastres no son naturales*. La Red. Recuperado de <http://www.desenredando.org/public/libros/1993/ldnsn/LosDesastresNoSonNaturales-1.0.0.pdf>

56. Mazariegos, M. (2017). *Guía de normas APA*. Guatemala, Guatemala: Centro Didáctico DDA. Recuperado de <http://cunzac.usac.edu.gt/wp-content/uploads/2017/10/Gu%C3%ADa-de-Normas-APA.pdf>
57. Mazariegos, V. (Agosto de 2012). *Análisis de vulnerabilidad global y amenaza a deslizamientos, Municipio de Santa Catarina Pinula, Guatemala, C.A.* Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala: Facultad de Agronomía. Recuperado de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/6442/>
58. McDaid Kapetsky, J., & Aguilar Manjarrez, J. (2009). *Sistemas de información geográfica, sensores remotos y mapeo para el desarrollo y la gestión de la acuicultura marina*. Roma, Italia: FAO. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-a0906s.pdf>
59. Melo, W., & Chávez, C. (2005). *Interpretación Visual de imágenes de sensores remotos y su aplicación en levantamientos de Cobertura y Uso de la Tierra*. Colombia: Instituto Geográfico Agustín Codazz. Recuperado de <https://www.worldcat.org/title/interpretacion-visual-de-imagenes-de-sensores-remotos-y-su-aplicacion-en-levantamientos-de-cobertura-y-uso-de-la-tierra/oclc/318365560>
60. Monzón, H. (1991). *El valle de Guatemala, una maravilla geológica*. Guatemala: ASDI, UNICEF, UNIPAR.

61. Mora Chinchilla, R., Chaves Gamboa, J., & Vásquez Fernández, M. (17 de octubre de 2015). *Zonificación de la susceptibilidad al deslizamiento: Resultados obtenidos para la península de Papagayo, mediante la modificación del método Mora Vahrson*. (E. C. Geología, Ed.). Recuperado de <https://www.eird.org/deslizamientos/pdf/spa/doc15359/doc15359.htm>
62. Mora, S., & Valverde, R. (2005). *Procesos de la dinámica interna y externa*. (U. d. Rica, Ed.) Costa Rica, Costa Rica: Editorial tecnológica de Costa Rica.
63. Mora, S., & Varson, W. (1994). Macrozonation methodology for landslide hazard determination. *Bulleting of the Association of Engineering and Geologist*, 49-58. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Sergio_Mora_Castro/publication/275971541_Macrozonation_Methodology_for_Landslide_Hazard_Determination/links/571fdb608aed056fa235aba/Macrozonation-Methodology-for-Landslide-Hazard-Determination.pdf
64. Morales Maldonado, J. (2011). *Análisi histórico de las transformaciones expirmentales por las representaciones cartográficas en Guatemala: Período 1529 - 2009*. Universidad de San Carlos de Guatemala, Centro Universitario de Occidente. Quetzaltenango: Ingeniería en administración de tierras. Recuperado de <http://www.cyticunoc.gt/wp-content/uploads/2017/10/Morales-Maldonado-Jorge-Eduardo-2011.pdf>

65. NASA. (1997-2019). *Socioeconomic Data and Applications Center (sedac)*. (NASA, Editor) Recuperado de <http://sedac.ciesin.columbia.edu/data/collection/ulandsat/maps/gallery/search?facets=region:north%20america>
66. NASA. (21 de 04 de 2019). *Sensor remoto GIOVANNI*. (EARTHDATA, Editor) Recuperado de [https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/#service=HiGm&starttime=1998-01-01T00:00:00Z&endtime=2018-10-31T23:59:59Z&bbox=-90.5555,14.6307,-90.4889,14.6681&data=TRMM_3B43_7_precipitation\(units%3Dmm%2Fmonth\)&dataKeyword=Precipitation](https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/#service=HiGm&starttime=1998-01-01T00:00:00Z&endtime=2018-10-31T23:59:59Z&bbox=-90.5555,14.6307,-90.4889,14.6681&data=TRMM_3B43_7_precipitation(units%3Dmm%2Fmonth)&dataKeyword=Precipitation)
67. Obregón, N. (2005). *Manual para el manejo y procesamiento de imágenes satelitales*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana. Recuperado de https://www.academia.edu/10703593/MANUAL_PARA_EL_MANEJO_Y_PROCESAMIENTO_DE_IMGENES_SATELITALES_OBTENIDAS_DEL_SENSOR_REMOTO_MODIS_DE_LA_NASA_APLICADO_EN_ESTUDIOS_DE_INGENIERIA_CIVIL
68. Olaya, V. (20 de junio de 2019). *Procesado de imagenes*. Recuperado de <https://volaya.github.io/libro-sig/chapters/Imagenes.html>
69. Olivares, R. B. (2004). La estructura del relieve como patrón principal de los estudios de impacto ambiental. En R. B. Olivares, *La estructura del relieve como patrón principal de los estudios de impacto ambiental*. Chile: Revista de Geografía.

70. OpenMind. (23 de abril de 2016). *Max Planck, el Mesías de la física cuántica*. Recuperado de <https://www.bbvaopenmind.com/ciencia/grandes-personajes/max-planck-el-mesias-de-la-fisica-cuantica/>
71. Palma Urrutia, E. (2009). *Expresiones territoriales de la precariedad urbana en Guatemala* (Vol. III). (C. d. Regionales, Ed.) Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala. Recuperado de <http://polidoc.usac.edu.gt/library/index.php?title=25707&lang=%20%20&query=@title=Special:GSMSearchPage@process=@field1=encabezamiento@value1=ASENTAMIENTOS%20@mode=advanced&recnum=3&mode=advanced>
72. Pérez, C. (2009). *Estudio geotécnico para la planificación de la construcción de la Planta para proceso de alimentos ACSA, San José Pinula, Guatemala*. Guatemala: Ingeniería de Materiales. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/454/45437348006.pdf>
73. Piedra Vilches, J. (2016). *Estudio de erupciones volcánicas a través de imágenes satelitales caso de estudio: erupción volcán Puyehue, Chile*. Facultad de matemática, astronomía y física. Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba. Recuperado de <https://www.famaf.unc.edu.ar/documents/1345/37-Piedra-Juan.pdf>
74. Planck. (1900). *Open Mind*. Recuperado de <https://www.bbvaopenmind.com/ciencia/grandes-personajes/max-planck-el-mesias-de-la-fisica-cuantica/>

75. Platas López, F., Morán Mérida, A., Aragón González, J., Olayo Ortiz, L., Osnayo Baltierra, S., Muñiz Soria, M., & Zarur Cortés, J. (2016). *Vulnerabilidad y riesgo urbano, aportes desde la experiencia Guatemala y México*. (C. d. Regionales, Ed.) Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
76. Quaas Weppen, R., Gurza Jaidar, L., & Zepeda Ramos, O. (2009). Uso de la información geoespacial en la prevención de riesgos. *Ninth United Nations Regional Cartographic Conference for the Americas* (pág. 15). New York: SEEGOB.
77. Quattrochi, D. A., & Goodchild, M. F. (1997). *Scale in remote sensing and GIS*. (CRC, Ed.) Santa Barbara, California, Estados Unidos: Lewis Publishers.
78. Ramanujan. (20 de marzo de 2012). *La sorprendente química del espacio*. Recuperado de La sorprendente química del espacio: <https://ramanujan25449.blogspot.com/?view=snapshot>
79. Ramírez Daza, H. M., & Espejo Delgado, N. C. (2012). *Manual de prácticas de percepción remota con el programa ERDAS IMAGINE 2011* (Vol. I). (CIAF, Ed.) Bogotá, DC., Colombia: Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Recuperado de http://www.un-spider.org/sites/default/files/ManualERDAS_web.pdf

80. Ramos Aguilar, R., Rivera Domínguez, A., Mayorga Raposo, R., & González Guevara, J. (2004). Aplicación de imágenes satelitales para determinar el clima y la radiación solar en el Estado de Puebla y la geohidrología de su zona norte. *Ciencia Ergo Sum*, 283-294. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/104/10410306.pdf>
81. Ramos Bernal, R., Vázquez Jiménez, R., Romero Calcerrada, R., & Novillo, C. (2015). *Identificación de deslizamientos de laderas aplicando técnicas de detección de cambios a imágenes Landsat en la zona costera del Estado de Guerrero, México*. Zaragoza: Universidad de Zaragoza. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/283301065_Identificacion_de_deslizamientos_de_laderas_aplicando_tecnicas_de_deteccion_de_cambios_a_imagenes_Landsat_en_la_zona_costera_del_Estado_de_Guerrero_Mexico
82. Renda, E. (2017). *Manual para elaboración de mapas de riesgos*. Buenos Aires, Argentina: Programa Naciones Unidas para el Desarrollo. Recuperado de <http://www.nosolosig.com/libros-geo/913-manual-para-la-elaboracion-de-mapas-de-riesgo>
83. Reuter, F. (Enero de 2002). Teledetección forestal. *Georeferenciación de imágenes*. Santiago del Estero, Gran Chaco, Argentina. Recuperado de <http://fcf.unse.edu.ar/archivos/lpr/pdf/p1a.pdf>

84. Robertson, K. (1989). *Actividad neotectónica del piedemonte de la cordillera Oriental*. Bucaramanga: Memorias del V Congreso Colombiano de Geología. Recuperado de <https://catalogo.sgc.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=20763>
85. Robertson, K. (2005). *Morfotectónica y dataciones del fallamiento activo del piedemonte llanero*. Bogotá: Memorias del X Congreso Colombiano de Geología. recuperado de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_nlinks&ref=000166&pid=S0121-215X201300020001000039&lng=en
86. Rodas, F. (2005). *Asentamientos precarios en la ciudad de Guatemala. Problemáticas y pautas de actuación*. Guatemala: OXFOM. Recuperado de <http://biblioteca.flacso.edu.gt/library/index.php?title=55508&query=@title=Special:GSMSearchPage@process=@field1=encabezamiento@value1=ASENTAMIENTOS%20URBANOS%20%20GUATEMALA%20@mode=advanced&recnum=4>
87. Rodríguez Chávez, O., & Arredondo Bautista, H. (2005). *Manual para el manejo y procesamiento de imágenes satelitales obtenidas del sensor remoto Modis de la NASA aplicado en estudios de ingeniería civil*. Tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Javeriana, Ingeniería Civil, Bogotá D.C.
88. Roy, P., & Tomar, S. (2001). Landscape cover dynamics pattern in Meghalaya. *International Journal of Remote Sensing*. Recuperado de http://www.reddccadgiz.org/documentos/doc_1767546776.pdf

89. Ruíz, P., Garro, J., & Soto, G. (2014). El uso de imágenes Lidar en Costa Rica: Casos de estudios aplicados en geología, ingeniería y arqueología. *Redalyc*, 7-31. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=45433964001>
90. Salgado, R. A., Velásquez, S., Jimenéz, F., & Faustino, J. (2005). Análisis integral del riesgo a deslizamientos e inundaciones en la microcuenca del río Gila, Honduras. *Recursos Naturales y Ambiente*, 48-102. Recuperado el 19 de junio de 2018, de <http://docplayer.es/53829880-Analisis-integral-del-riesgo-a-deslizamientos-e-inundaciones-en-la-microcuenca-del-rio-gila-honduras1.html>
91. Sánchez Ramos, A. (2009). *Análisis Multitemporal de la Cobertura de la Tierra en la Cuenca del Valle de Jesús de Otoro entre los años 2000-2006, aplicando técnicas de teledetección*. Honduras: Universidad Autónoma de Honduras. Recuperado de http://faces.unah.edu.hn/decanato/images/stories/PDF/Revista_Congreso_V2/analisis_multitemporal_cobertura.pdf
92. Santana, G. (1996). Normas estructurales de diseño y construcción recomendadas para la República de Guatemala. Guatemala: Comité técnico y bajo la supervisión del Ministerio de Comunicaciones y Transportes. Recuperado de <https://www.eird.org/cd/acs/Espanol/EvalCodi/HablaEsp/Sismos/GUATecs.pdf>

93. Sapper, K. (1937). *Muestra clases de rocas, períodos geológicos e información tectónica*. Guatemala: Dirección General de Minería e Hidrocarburos.

94. SIG ARTEAGA. (10 de mayo de 2016). *Youtube*. Obtenido de Gap Fill / Filling Gap ENVI 5 2016 Corrección de LANDSAT 7: <https://www.youtube.com/watch?v=tG2V52Db-J8>

95. SIGSA. (08 de 07 de 2019). *ENVI*. Recuperado de <http://www.sigsa.info/productos/envi>

96. Simmons, C. S., Tárano, J. M., & Pinto, J. M. (1959). Clasificación de Reconocimiento de los Suelos de la República de Guatemala. En *Clasificación de Reconocimiento de los Suelos de la República de Guatemala* (pág. 999). Guatemala: Ministerio de Educación Pública "José de Pineda Ibarra".

97. Sitjar, J., & Busquets, A. (12 de julio de 2019). *Taller de teledetección*. Recuperado de <https://sigte-tallerjornadas2015.readthedocs.io/es/latest/>

98. Swain, P. H., & Davis, S. M. (1978). *Remote Sensing: The Quantitative Approach*. Nueva York: MacGraw-Hill.

99. Tobías, C. (1993). Evaluación de la amenaza sísmica para la Ciudad de la Guatemala. En C. Tobías, *Evaluación de la amenaza sísmica para la Ciudad de la Guatemala*. Guatemala: Dirección General de Investigación –DIGI- .

100. U.S. Geological Survey. (14 de 6 de 2019). *Geología y superficie de la tierra*. Recuperado de <https://www.usgs.gov>

101. U.S. Geological Survey. (7 de 2 de 2019). *LANDSAT USGS*. Recuperado de Science for a changing world: <https://landsat.usgs.gov/what-are-band-designations-landsat-satellites>

102. Universidad de San Carlos de Guatemala. (2019). *Ensayo triaxial*. Guatemala: Laboratorio Mecánica de suelos.

103. Universidad Rafael Landívar. (2005). Amenazas al ambiente y vulnerabilidad social en Guatemala. En U. R. Landívar, *Documento técnico del perfil ambiental de Guatemala* (Vol. I, pág. 34). Guatemala: Instituto de Incidencia Ambiental. Recuperado de http://recursosbiblio.url.edu.gt/publicjlg/IARNA/serie_ambi/01.PDF

104. USAC / UNICEF / UNEPAR / CONRED. (2001). *Desastres naturales y zonas de riesgo en Guatemala*. Guatemala, ASDI, UNICEF. Recuperado de <http://desastres.usac.edu.gt/documentos/docgt/pdf/spa/doc0089/doc0089.pdf>

105. USAID. (1991). *Desastres, planificación y desarrollo: Manejo de amenazas naturales para reducir los daños*. Washington, D.C., Estados Unidos: USAID. Recuperado de <http://www.oas.org/usde/publications/Unit/oea57s/begin.htm>

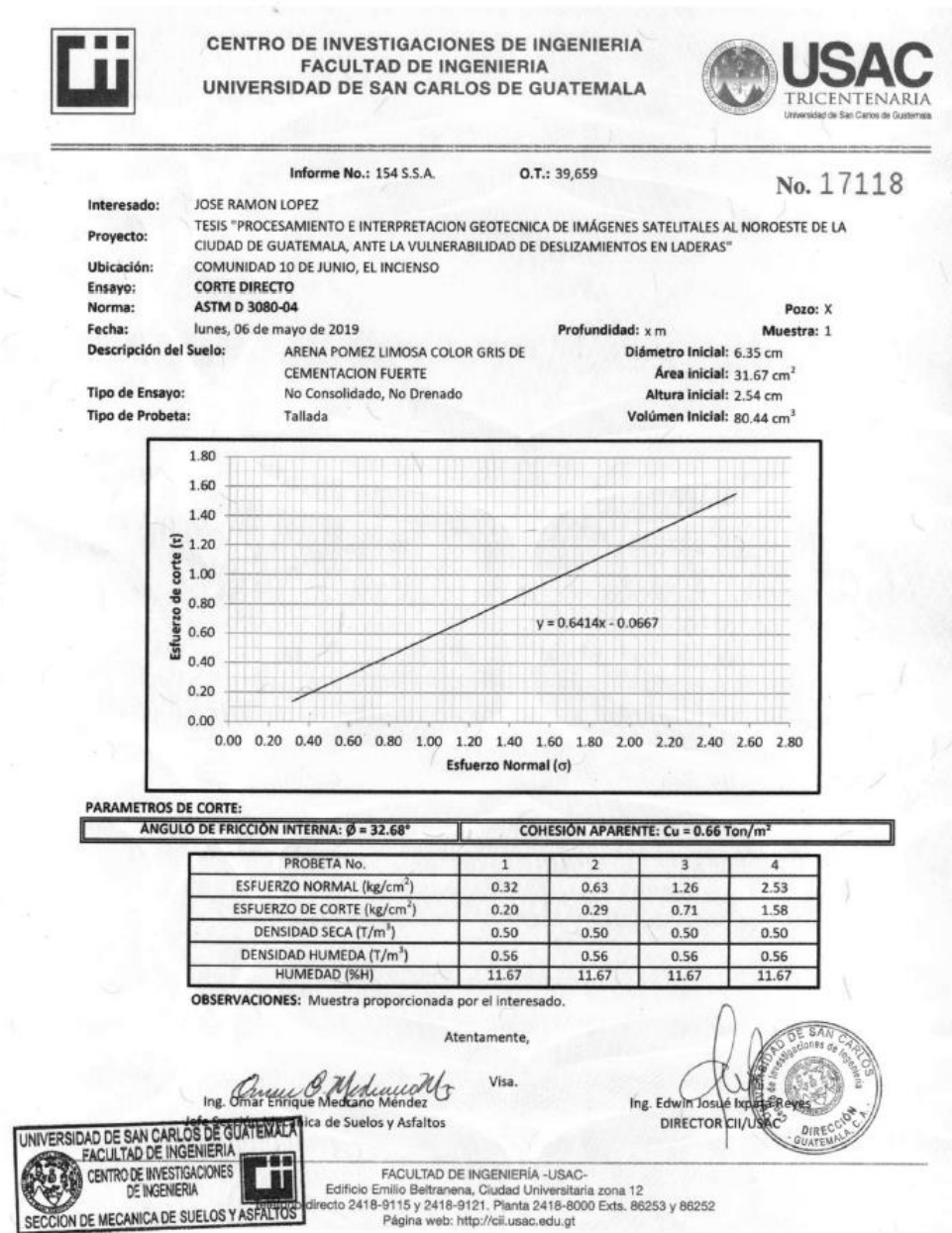
106. USGS. (03 de 04 de 2009). *Sensor remoto Landsat 7*. Recuperado de <https://earthexplorer.usgs.gov/logout/expire>

107. Valladares, V. (2011). *Área metropolitana de la ciudad de Guatemala*. Guatemala: Centro de Estudios Urbanos y Regionales. Recuperado de <http://worldcat.org/identities/lccn-nr2001018565/>
108. Vargas. (2002). *Políticas públicas para la reducción de la vulnerabilidad frente a los desastres naturales y socio-naturales* (Vol. No. 50). (N. Unidas, Ed.) Santiago de Chile: Serie de Medio Ambiente y Desarrollo. Recuperado de <https://www.cepal.org/es/publicaciones/5749-politicas-publicas-la-reduccion-la-vulnerabilidad-frente-desastres-naturales>
109. Vargas Sanabria, D., & Campos Vargas, C. (2017). *Sistema multi-algoritmo para la clasificación de coberturas de la tierra en el bosque seco tropical del Área de Conservación Guanacaste, Costa Rica*. Costa Rica: Universidad Estatal de Costa Rica. Recuperado de https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0379-39822018000100058
110. Vargas, R. (2010). *Guía de Planificación Territorial*. La Paz, Bolivia. Recuperado de http://fundaciondemuca.com/public_files/70/guia_cpotm_9.pdf
111. Vázquez Rivera, R., Vargas Pérez, E., Terranzas Domínguez, S., & Gavi Reyes, F. (2002). Utilización de imágenes de satélite para determinar áreas con problemas de lixiviación de nitratos. *Chapingo*, 31-37. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/629/62980103.pdf>

112. Villajos, S. O. (2006). *Teledetección Fundamental*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado de <http://pdi.topografia.upm.es/santi/descarga/FunTeled.PDF>
113. Villalon, H. E. (septiembre de 2017). *ResearchGate*. Recuperado el 6 de febrero de 2019, de https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Representacion-del-espectro-electromagnetico-en-la-region-de-luz-visible_fig1_319880879
114. Wang, & He. (1991). *Estudios geológicos a partir de imágenes SAR para discriminar las diferentes unidades litológicas presentes*.
115. Weyl, R. (1980). *Geology of Central America*. Science Publishers. Recuperado de https://www.schweizerbart.de/publications/detail/isbn/9783443110154/Weyl_Central_America_2nd_completely_r
116. Yébenes Gómez, Á., & Giner Sotos, Á. (23 de junio de 2019). *Clasificación digital de imágenes por satélite*. Recuperado de <http://mural.uv.es/gislo/telemetida.pdf>


ANEXOS

Anexo 1. Resultados de análisis de laboratorio de suelos en taludes, cercanos al puente el incienso




Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala (2019). Adaptado del ensayo corte directo para determinación de densidad, cohesión característica del suelo.

Anexo 2. Resultados de análisis de laboratorio de suelos en taludes, cercanos al puente el incienso



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



Informe No.: 167 S.S.A. **O.T.:** 39,695

No. 17184

Interesado: José Ramón López López

Proyecto: Procesamiento e interpretación geotécnica de imágenes satelitales al noroeste de la Ciudad de Guatemala, ante la vulnerabilidad de deslizamientos

Ubicación: Comunidad 10 de junio, El Incienso

Ensayo: CORTE DIRECTO

Norma: ASTM D 3080-04

Fecha: viernes, 10 de mayo de 2019

Muestra: 1

Diámetro Inicial: 6.35 cm

Área inicial: 31.67 cm²

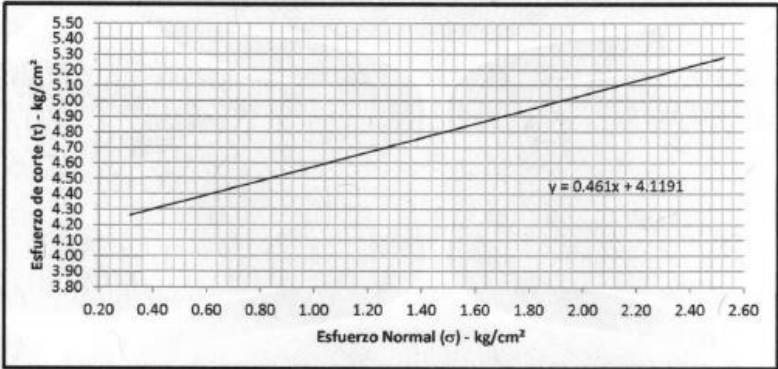
Altura inicial: 2.54 cm

Volúmen Inicial: 80.44 cm³

Descripción del Suelo: Arena limosa color gris de cementación fuerte

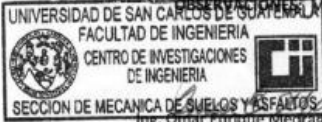
Tipo de Ensayo: No Consolidado, No Drenado

Tipo de Probeta: Tallada



PARAMETROS DE CORTE:


| | | | | |
|--|--|-------|-------|-------|
| ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA: $\phi = 24.75^\circ$ | COHESIÓN APARENTE: $C_u = 41.19 \text{ Ton/m}^2$ | | | |
| PROBETA No. | 1 | 2 | 3 | 4 |
| ESFUERZO NORMAL (kg/cm ²) | 0.32 | 0.63 | 1.26 | 2.53 |
| ESFUERZO DE CORTE (kg/cm ²) | 3.86 | 4.55 | 5.20 | 5.05 |
| DENSIDAD SECA (Ton/m ³) | 0.95 | 0.95 | 0.95 | 0.95 |
| DENSIDAD HUMEDA (Ton/m ³) | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 |
| HUMEDAD (%H) | 11.77 | 11.77 | 11.77 | 11.77 |




UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
 FACULTAD DE INGENIERIA
 CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
 SECCION DE MECANICA DE SUELOS Y ASFALTOS
 Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
 Jefe Sección Mecánica de Suelos y Asfaltos

Atentamente,

Visa.



Ing. Edwin Josué Ixpate Reyes
 DIRECTOR CII/USAC



FACULTAD DE INGENIERIA -USAC-
 Edificio Emilio Beltrana, Ciudad Universitaria zona 12
 Teléfono directo 2418-9115 y 2418-9121. Planta 2418-8000 Exts. 86253 y 86252
 Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala (2019). Adaptado del ensayo corte directo para determinación de densidad, cohesión característica del suelo