



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
CENTRO DE GEOCIENCIAS

Análisis de factores que promueven la formación de flujos de escombros en la
cuenca del río Salsipuedes, San Gabriel, Jalisco.

TESIS

Que para optar por el grado de:
Maestra en Ciencias de la Tierra

Presenta:

Lizeth Mariela Cortes López

Tutora de Tesis:

Dra. Lucia Capra Pedol (Centro de Geociencias, UNAM)

Miembros del Comité:

Dra. Lizeth Caballero García (Facultad de Ciencias, UNAM)

Dr. Pierre Lacan (Centro de Geociencias, UNAM)

Dr. Mario Guevara Santamaria (Centro de Geociencias, UNAM)

Dr. Lorenzo Borselli (Instituto de Geología, UASLP)

Querétaro, México 2023.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Declaratoria de ética

Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al calce que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría. Todas las citas de, o referencias a la obra de otros autores aparecen debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante los recursos editoriales convencionales.



Lizeth Mariela Cortes López

Lizeth Mariela Cortes López

Este trabajo está dedicado

A mis padres y hermana

Por su esfuerzo, valentía, por sus palabras de motivación, por nunca dejarme sola, respetar mis decisiones, por impulsarme a alcanzar mis metas y por un sin fin de cosas más.

Sin su apoyo incondicional en todos los ámbitos no hubiera podido llegar a donde estoy.

¡que admirables son!

Agradecimientos

A la Dra. Lucia Capra, por aceptarme una vez más como mi asesora, por su apoyo, disponibilidad para resolver dudas del proyecto, con sus aportes profesionales que la caracterizan, por dejarme aprender de usted, una gran científica, por la confianza brindada académicamente y personalmente. Gracias por tanto y por todo.

Al jurado revisor Dra. Lizeth Caballero García, Dr. Lorenzo Borselli, Dr. Pierre Lacan y Dr. Mario Guevara, por su tiempo, por sus valiosos comentarios hacia el proyecto de investigación, resolviendo dudas que surgían, así como a sus respectivas clases que fueron muy amenas y enriquecedoras. Muchas gracias.

A la Mtra. Sara Solís, por el tiempo y las enseñanzas dentro del laboratorio de Edafología. A Protección Civil y Bomberos de Ciudad Guzmán, Jalisco, por el tiempo brindado durante el trabajo de campo en el municipio de San Gabriel, Jalisco.

A CONACYT por la beca otorgada durante los estudios de posgrado.

A la base de esta pequeña familia: mis abuelos, por su motivación, cuidados y cariño. Infinitas gracias.

A los amigos y compañeros que forman parte de este viaje, especialmente a Elisa Cuellar, quien siempre ha estado ayudándome y salvándome en la parte académica, pero sobre todo en la vida, espero que siempre cuente contigo, y tú conmigo. Te agradezco mucho Eli.

Índice

Índice.....	v
Índice de Figuras.....	vii
Índice de Tablas	ix
Resumen.....	1
Capítulo 1: Introducción.....	3
1.1 Planteamiento del problema	3
1.2 Justificación	4
1.3 Hipótesis	5
1.4 Objetivos.....	5
Capítulo 2. Marco Teórico	7
2.1 Origen de los flujos de escombros.....	7
2.2 Características de los flujos de escombros	9
2.3 Depósitos.....	10
2.4 Reología de los flujos de escombros	11
2.5 Erosión de los flujos.....	12
Capítulo 3. Zona de estudio	13
3.1 Clima.....	14
3.2 Vegetación.....	14
3.3 Suelos.....	14
3.4 Evento del 2019, San Gabriel, Jalisco	14
Capítulo 4. Metodología.....	18
4.1. Análisis morfológico.....	19
4.2. Cambio de Uso de Suelo y Vegetación	19
4.3 Trabajo de campo.....	20
4.4 Trabajo de laboratorio.....	21
4.5 Análisis de susceptibilidad a la erosión	27
4.6 Análisis de precipitación	31
4.7 Simulaciones para la caracterización hidrológica de las cuencas y definición de las zonas de posible inundación	34
Capítulo 5: Resultados	37
5.1 Análisis morfológico.....	37
5.2 Áreas afectadas por los incendios	42
5.3 Análisis espacio-temporal de uso de suelo y vegetación	44
5.4 Características texturales y granulométricas de los suelos en la cuenca de San Gabriel.....	53

5.5 Características físicas y químicas de los suelos y del flujo de escombros.....	67
5.6 Susceptibilidad a la erosión en la cuenca San Gabriel.....	72
5.7 Análisis de la precipitación.....	75
5.8 Simulaciones para la caracterización hidrológica de las cuencas y definición de las zonas de posible inundación	92
Capítulo 6: Discusión	113
Capítulo 7: Conclusiones	117
Referencias.....	118

Índice de Figuras

FIGURA 1: MODELO CONCEPTUAL PARA LLUVIAS INTENSAS, INFILTRACIÓN Y ACUÍFEROS TEMPORALES EN LADERAS POCO PROFUNDAS (CAMPBELL, 1975).....	8
FIGURA 2: ESQUEMA QUE MUESTRA UNA VISTA DE LADO Y DE PLANTA, LAS PARTES DE UN FLUJO DE ESCOMBROS: CABEZA, CUERPO Y COLA (VALLANCE, 2005).....	10
FIGURA 3: UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA CUENCA SAN GABRIEL, AL SUR DEL ESTADO DE JALISCO.	13
FIGURA 4: IMÁGENES QUE MUESTRAN LOS DEPÓSITOS Y MARCAS DE LA ALTURA DEL FLUJO DE ESCOMBRO EN EL POBLADO DE SAN GABRIEL, CON PROFUNDIDADES DE HASTA 6 M DESDE LA BASE DEL CANAL (IMÁGENES DE VIDEOS REPORTADOS POR NOTICIEROS Y PERIÓDICOS INFORMAFOR.MX).	16
FIGURA 5: COMPARACIÓN ENTRE DOS IMÁGENES SATELITALES SENTINEL-2 PARA LA IDENTIFICACIÓN DE LA ZONA INUNDADA POR EL FLUJO DE ESCOMBRO CON FECHAS DE: A) JUNIO 2019 (ANTES DEL EVENTO) Y B) 2 DE JULIO DE 2019.	17
FIGURA 6: ESQUEMA DE LA METODOLOGÍA QUE SE EMPLEÓ EN ESTE TRABAJO; F.E: FLUJO DE ESCOMBROS.....	18
FIGURA 7: MAPA QUE MUESTRA LA LOCALIZACIÓN DE LOS DEPÓSITOS Y SUELOS ANALIZADOS EN EL TRABAJO DE CAMPO EN LA CUENCA SAN GABRIEL, JALISCO.	20
FIGURA 8: MATERIALES EMPLEADOS PARA LA OBTENCIÓN DEL PORCENTAJE DE HUMEDAD: BALANZA ANALÍTICA Y RECIPIENTES DE ALUMINIO.....	21
FIGURA 9: MATERIALES UTILIZADOS PARA LA MEDICIÓN DEL PH EN CADA MUESTRA.....	22
FIGURA 10: MATERIALES REQUERIDOS PARA LA OBTENCIÓN DE VALORES DE LA MATERIA ORGÁNICA PARA LAS MUESTRAS.	24
FIGURA 11: MATERIALES EMPLEADOS PARA CONOCER LA TEXTURA DE LOS SUELOS ANALIZADOS: PROBETAS, HIDRÓMETRO DE BOUYOUCOS Y BATIDORAS.	26
FIGURA 12: MATERIALES UTILIZADOS PARA LA OBTENCIÓN DE LA DENSIDAD REAL DE LOS AGREGADOS DEL SUELO.	27
FIGURA 13: LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DE LAS DOS ESTACIONES METEOROLÓGICAS (CONAGUA): ESTACIÓN SAN GABRIEL Y ESTACIÓN CIUDAD GUZMÁN.	33
FIGURA 14: MAPA HIPSOMÉTRICO EN M.S.N.M DE LA CUENCA SAN GABRIEL.	37
FIGURA 15: MAPA QUE MUESTRA LA DIVISIÓN DE LAS 12 SUBCUENCAS DENTRO DE LA CUENCA DE SAN GABRIEL.	39
FIGURA 16: MAPA DE PENDIENTES, EXPRESADO EN GRADOS CON LA DELIMITACIÓN DE LAS SUBCUENCAS.	40
FIGURA 17: MAPA DE COBERTURAS DE LADERAS EN LA CUENCA.....	41
FIGURA 18: MAPA DE ORIENTACIONES EXPRESADAS EN GRADOS.	42
FIGURA 19: ÁREA QUE FUE AFECTADA POR LOS INCENDIOS, DELIMITADOS EN COLOR ROJO, A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES, CON FECHAS DE A) 8 DE MAYO DE 2019 Y B) 13 DE MAYO DE 2019.	44
FIGURA 20: USO DE SUELO ACTUAL EN LA CUENCA DE SAN GABRIEL CON 5 COBERTURAS: 1) ZONAS URBANAS, 2) CULTIVOS DE AGUACATE, 3) ZONA DE CULTIVOS VARIOS, 4) VEGETACIÓN NATURAL Y 5) SUELOS DESNUDOS.	45
FIGURA 21: HISTOGRAMA QUE MUESTRA LOS CAMBIOS DE USO DE SUELO Y VEGETACIÓN EN PORCENTAJE PARA LOS AÑOS 2014, 2019 Y 2022.	46
FIGURA 22: FOTO PERTENECIENTE A LA MUESTRA SG2105, ZONA QUE FUE AFECTADA POR LOS INCENDIOS, PERO ACTUALMENTE ES DESTINADA A UN ÁREA DE CULTIVO DE AGUACATE.....	47
FIGURA 23: GRÁFICAS QUE MUESTRAN LOS CAMBIOS OCURRIDOS (%) PARA LAS DIFERENTES COBERTURAS DEL SUELO EN EL PERIODO DE 2014-2022, POR CADA SUBCUENCA EN LA ZONA DE ESTUDIO.	50
FIGURA 24: MAPAS QUE MUESTRAN EL ANÁLISIS DE CAMBIOS EN EL USO DE SUELO Y VEGETACIÓN EN CADA SUBCUENCA, A) AÑO 2014, B) AÑO 2019 (FECHA DEL EVENTO) Y C) AÑO 2022.	52
FIGURA 25: GRÁFICAS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LABORATORIO: PORCENTAJE DE HUMEDAD, PH, M.O Y DENSIDAD REAL.	70
FIGURA 26: TRIANGULO DE TEXTURAS QUE VISUALIZA LA GRANULOMETRÍA DE LAS MUESTRAS (% DE ARENA, LIMO Y ARCILLA).	71
FIGURA 27: MAPA QUE MUESTRA LA SUSCEPTIBILIDAD DE EROSIÓN EN LAS SUBCUENCAS DE SAN GABRIEL PRE-INCENDIO.	74
FIGURA 28: MAPA QUE MUESTRA LA SUSCEPTIBILIDAD A LA EROSIÓN DESPUÉS DE LOS INCENDIOS OCURRIDOS EN EL AÑO 2019, EN LAS SUBCUENCAS DE SAN GABRIEL.	75
FIGURA 29: HISTOGRAMA DE PRECIPITACIONES PARA 46 AÑOS (1946-1991), PARA LA ESTACIÓN DE SAN GABRIEL.....	77

FIGURA 30: GRÁFICA DEL PORCENTAJE ACUMULADO VS LA PRECIPITACIÓN EN MM POR AÑO, USANDO LA PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA (Px) DE WEIBULL	77
FIGURA 31: GRÁFICA QUE MUESTRA EL NIVEL DE PRECIPITACIÓN EN MM, PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 50 AÑOS.	78
FIGURA 32: GRÁFICA DE LA PROBABILIDAD DE OCURRENCIA PARA 1, 5, 10, 25 Y 50 AÑOS.	78
FIGURA 33: PRECIPITACIÓN ANUAL EN MM, A PARTIR DE LA DISTRIBUCIÓN DE GUMBEL.	79
FIGURA 34: PRECIPITACIÓN MENSUAL EN MM, MOSTRANDO EL AJUSTE DE ACUERDO A LA DISTRIBUCIÓN DE GUMBEL.	81
FIGURA 35: LLUVIA MÁXIMA EN 1 DÍA, EN LOS AÑOS 1946-1991.	82
FIGURA 36: PRECIPITACIÓN MÁXIMA DIARIA EN MM, MOSTRANDO SU AJUSTE A PARTIR DE LA DISTRIBUCIÓN DE GUMBEL.	82
FIGURA 37: GRÁFICA DE LA PRECIPITACIÓN ACUMULADA DE 3-5 DÍAS, POR AÑO.	84
FIGURA 38: DISTRIBUCIÓN DE GUMBEL PARA LA PRECIPITACIÓN MÁXIMA ACUMULADA EN UN INTERVALO DE 3-5 DÍAS.	84
FIGURA 39: LLUVIA REGISTRADA EN EL MES DE JUNIO DE 2019, DATOS DE RADAR CLIMATESEV. RESALTANDO EL NIVEL DE LLUVIA CORRESPONDIENTE AL DÍA DEL EVENTO (2 DE JUNIO DE 2019).	85
FIGURA 40: HISTOGRAMA DEL HISTORIAL DE LLUVIA (1926-2018) PARA LA ESTACIÓN DE CIUDAD GUZMÁN.	86
FIGURA 41: HISTORIAL DE LLUVIA, PARA LOS AÑOS 1981 A 2018.	88
FIGURA 42: GRÁFICA QUE MUESTRA EL PORCENTAJE ACUMULADO CON RESPECTO AL NIVEL DE LLUVIA EN M, POR AÑO.	88
FIGURA 43: GRÁFICA QUE MUESTRA LA PRECIPITACIÓN EN MM PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 40 AÑOS.	89
FIGURA 44: GRÁFICA DE LA PROBABILIDAD DE OCURRENCIA PARA 1, 5, 10, 25 Y 50 AÑOS.	89
FIGURA 45: AJUSTE A PARTIR DE LA DISTRIBUCIÓN DE GUMBEL, PARA LA PRECIPITACIÓN ANUAL EN MM.	90
FIGURA 46: PRECIPITACIÓN MÁXIMA MENSUAL, MOSTRANDO EL AJUSTE A PARTIR DE LA DISTRIBUCIÓN DE GUMBEL.	92
FIGURA 47: UBICACIÓN DE LOS PERFILES UTILIZADOS PARA EL CÁLCULO DE LAS DESCARGAS DE AGUA EN CADA SUBCUENCA.	95
FIGURA 48: GRÁFICAS DE DESCARGA EN M ³ /S PARA CADA SUBCUENCA, PRE Y POST INCENDIO, RESULTADO DE SIMULAR UNA LLUVIA DE 150 MM.	98
FIGURA 49: CURVA HIDROGRÁFICA PRE INCENDIO, PARA LA SUBCUENCA 1 EN UN TIEMPO DE 2 HORAS.	101
FIGURA 50: CURVA HIDROGRÁFICA POST INCENDIO, DISTRIBUIDAS EN 2 HORAS PARA LA SUBCUENCA 1.	102
FIGURA 51: MAPA QUE MUESTRA EL FLUJO DE AGUA Y SEDIMENTOS PRE INCENDIO DEL ESCENARIO 1. SE INDICAN LOS 4 PERFILES TRAZADOS EN LA CABECERA MUNICIPAL DE SAN GABRIEL Y SE COMPARAN LAS PROFUNDIDADES DEL FLUJO EN METROS CON LAS OBSERVACIONES EN CAMPO (FOTOGRAFÍAS); A) SIMULACIÓN CON RESOLUCIÓN DE 30 M. Y B) RESOLUCIÓN DE 12.5 M.	104
FIGURA 52: MAPA DONDE SE OBSERVA LA SIMULACIÓN DE FLUJO DE AGUA Y SEDIMENTOS POST INCENDIO DEL ESCENARIO 1. SE INDICAN LOS 4 PERFILES TRAZADOS, COMPARANDO LAS PROFUNDIDADES DEL FLUJO OBSERVADO EN CAMPO; A) SIMULACIONES CON MALLA COMPUTACIONAL DE 30 M. Y B) MALLA COMPUTACIONAL DE 12.5 M.	106
FIGURA 53: MAPA QUE MUESTRA LOS ESPESORES PROMEDIO, AL INTEGRAR LOS ESCENARIOS PRE Y POST INCENDIO, ASÍ COMO LOS DIFERENTES PARÁMETROS REOLÓGICOS.	108
FIGURA 54: GRÁFICA DE LA CURVA HIDROGRÁFICA POST INCENDIO, PERTENECIENTE A LA SUBCUENCA 1.	109
FIGURA 55: MAPA QUE MUESTRA LAS PROFUNDIDADES PROMEDIO DE UN FLUJO DE ESCOMBROS EN SAN GABRIEL, JALISCO, PARA EL ESCENARIO 2 POST INCENDIO.	109
FIGURA 56: CURVA HIDROGRÁFICA UTILIZADA PARA LA SIMULACIÓN DE FLUJOS DE ESCOMBROS.	110
FIGURA 57: MAPA DE LAS PROFUNDIDADES PROMEDIO, PARA EL ESCENARIO 3: 90 MM, AL INTEGRAR LAS SIMULACIONES CAMBIANDO LOS PARÁMETROS REOLÓGICOS.	111
FIGURA 58: MAPAS DONDE SE MUESTRAN LAS ÁREAS DE INUNDACIÓN EN LA CUENCA DE SAN GABRIEL, PARA LOS PERIODOS DE RETORNO DE 5 Y 20 AÑOS.	112

Índice de Tablas

TABLA 1: CLASIFICACIÓN DE SOLUCIONES SEGÚN SU PH (MANUAL DE LABORATORIO, EDAFOLOGÍA).....	22
TABLA 2: CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS SEGÚN EL CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA.....	23
TABLA 3: DIFERENTES VALORES PARA EL FACTOR C, DE ACUERDO A LA COBERTURA DEL SUELO. OBTENIDO DE BORSSELLI ET AL., 2008.....	29
TABLA 4: CLASIFICACIÓN DE LA ERODIBILIDAD, PROPUESTA POR RIVERA Y GÓMEZ, 2009.....	30
TABLA 5: GEOMETRÍA DE LAS DOCE SUBCUENCAS E ÍNDICE DE GRAVELIUS (K_G).....	38
TABLA 6: CAMBIOS EN LAS COBERTURAS DEL SUELO EN KM^2 Y % PARA LOS AÑOS 2014, 2019 Y 2022 EN LA CUENCA.....	46
TABLA 7: CAMBIOS EN EL USO DE SUELO Y VEGETACIÓN EXPRESADO EN PORCENTAJE, (AÑOS 2014, 2019 Y 2022) Y % AFECTADO POR LOS INCENDIOS POR SUBCUENCA OCURRIDOS EN 2019.....	48
TABLA 8: RESULTADOS OBTENIDOS EN LABORATORIO PARA CADA MUESTRA, %H: PORCENTAJE DE HUMEDAD, M.O: MATERIA ORGÁNICA, P: DENSIDAD REAL, A: ARENAS, L: LIMOS Y R: ARCILLAS, Y EL USO DE SUELO AL QUE PERTENECEN.....	67
TABLA 9: VALORES UTILIZADOS PARA EL FACTOR C PARA CADA COBERTURA DEL SUELO.....	72
TABLA 10: RESULTADOS DE FACTOR K POR MEDIO DEL PROGRAMA KUERY 1.5 (BORSSELLI, 2012); Md: MODERADO/MEDIO, SOM: MATERIA ORGÁNICA.....	72
TABLA 11: DATOS DE LLUVIA HISTÓRICAS ORDENADOS DE MAYOR A MENOR SEGÚN SU NIVEL DE PRECIPITACIÓN EN MM POR AÑO; N: NÚMERO DE DATOS, Px: PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA, Pr: PERIODOS DE RETORNO, P_N : PROBABILIDAD DE OCURRENCIA.....	76
TABLA 12: NIVEL DE LLUVIA ANUAL ESPERADA (MM) PARA DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO: 5, 10, 15 Y 20 AÑOS; F(x): PROBABILIDAD DE QUE OCURRA.....	79
TABLA 13: LLUVIA MENSUAL EN MM, ORDENADA DE MAYOR A MENOR, CON LA DISTRIBUCIÓN DE GUMBEL; Px: PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA.....	80
TABLA 14: PRECIPITACIÓN MENSUAL ESPERADA PARA DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO (5, 10, 15 Y 20 AÑOS), A PARTIR DE LA ECUACIÓN DE GUMBEL.....	81
TABLA 15: NIVEL DE LLUVIA DIARIA PARA DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO (5, 10, 15 Y 20 AÑOS).....	83
TABLA 16: LLUVIA EN MM ACUMULADA DE 3-5 DÍAS, ORDENADAS DE MAYOR A MENOR, CON SU DISTRIBUCIÓN DE GUMBEL.....	83
TABLA 17: NIVEL DE LLUVIA ESPERADA EN MM PARA LOS PERIODOS DE RETORNO DE 5, 10, 15 Y 20 AÑOS.....	85
TABLA 18: DATOS DE LLUVIA POR AÑO, ORDENADAS DE MAYOR A MENOR PARA LA ESTACIÓN DE CIUDAD GUZMÁN (1981-2018); N= NÚMERO DE DATOS, Px: PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA, Pr: PERÍODO DE RETORNO, P_N : PROBABILIDAD DE OCURRENCIA.....	86
TABLA 19: NIVEL DE LLUVIA ANUAL ESPERADA PARA DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO (5, 10, 15 Y 20 AÑOS).....	90
TABLA 20: LLUVIA MENSUAL EN MM, ORDENADAS DE MAYOR A MENOR, CON SU RESPECTIVA DISTRIBUCIÓN DE GUMBEL.....	91
TABLA 21: LLUVIAS MENSUALES ESPERADAS EN MM PARA 5, 10, 15 Y 20 AÑOS.....	92
TABLA 22: NÚMEROS DE CURVA (NC) ASIGNADA PARA CADA COBERTURA DE SUELO EN LA CUENCA SAN GABRIEL.....	93
TABLA 23: NÚMERO DE CURVA POR CADA SUBCUENCA PARA EL 2019, PRE Y POST INCENDIO.....	93
TABLA 24: VALORES DE TIEMPO, DESCARGAS Y VOLUMEN MÁXIMO PARA CADA SUBCUENCA, PARA LLUVIAS DE 150 MM Y USANDO EL NÚMERO DE CURVA PARA 3 AÑOS 2014, 2019 Y 2022 (CORRESPONDIENTE A LOS AÑOS ANALIZADOS EN EL CAMBIO DE USO DE SUELO) Y POST INCENDIO; K_G : ÍNDICE DE GRAVELIUS, NC: NÚMERO DE CURVA.....	96
TABLA 25: PARÁMETROS REOLÓGICOS UTILIZADOS PARA LAS SIMULACIONES DE FLUJOS DE AGUA Y SEDIMENTOS, O'BRIEN Y JULIEN, 1998.....	100
TABLA 26: MUESTRA LAS DESCARGAS PRE INCENDIO DE LA SUBCUENCA 1, DISTRIBUIDAS EN 2 HORAS, CON SU RESPECTIVA CONCENTRACIÓN DE SEDIMENTOS (Cv).....	100
TABLA 27: DESCARGAS POST INCENDIO EN M^3/s PARA LA SUBCUENCA 1; Cv: CONCENTRACIÓN DE SEDIMENTOS.....	101
TABLA 28: ESPESORES MÁXIMOS EN METROS A LO LARGO DE LOS 4 PERFILES AL VARIAR LOS PARÁMETROS REOLÓGICOS PARA EL ESCENARIO 1.....	103
TABLA 29: VALORES DE LAS DESCARGAS POST INCENDIO CON SU RESPECTIVA CONCENTRACIÓN DE SEDIMENTOS (Cv), CORRESPONDIENTE A LA SUBCUENCA 1, EN UN TIEMPO DE 1 HORA.....	108
TABLA 30: VALORES DE DESCARGA Y CONCENTRACIÓN DE SEDIMENTOS (Cv), DISTRIBUIDAS EN 1 HORA.....	110
TABLA 31: ESPESORES MÁXIMOS EN METROS DEL FLUJO DE ESCOMBROS, CALCULADOS PARA CADA PERFIL Y PARA DIFERENTES PARÁMETROS REOLÓGICOS.....	111
TABLA 32: VOLUMEN DE LOS FLUJOS DE ESCOMBROS, RESULTADO DE LAS SIMULACIONES. ESCENARIO 1: 150 MM DE LLUVIA ACUMULADA DE 3-5 DÍAS, PERÍODO DE RETORNO DE 20 AÑOS; ESCENARIO 2: LLUVIA DE 100 MM ACUMULADA DE 3-5 DÍAS, PERÍODO DE RETORNO DE 5 AÑOS Y ESCENARIO 3: LLUVIA DE 90 MM ACUMULADA EN 1 DÍA, PERÍODO DE RETORNO DE 20 AÑOS.....	111

Resumen

Los flujos de escombros son mezclas de sedimentos y agua, que se desarrollan a lo largo de pendientes, bajo la fuerza de gravedad. Son capaces de movilizar grandes volúmenes de sedimentos, los cuales producen efectos devastadores para la población y la infraestructura que se encuentra expuesta, por lo que su estudio es de gran importancia. El 2 de junio de 2019 en el municipio de San Gabriel, Jalisco, el desbordamiento del río Salsipuedes acompañado por el emplazamiento de flujos de escombros, provocó el fallecimiento de cinco personas, varios damnificados, y daños en bienes materiales y vialidad. Los flujos de escombros, con profundidades de más de 6 metros, bajaron por el canal que atraviesa el centro urbano, arrastrando gran cantidad de troncos que flotaban en su superficie. El evento ocurrió por lluvias intensas en la cuenca hidrológica que en semanas anteriores había sido afectada por incendios. Existen registros históricos de procesos similares ocurridos durante eventos hidrometeorológicos extremos en la misma cuenca. El objetivo de la investigación es identificar los factores que propician la formación de flujos de escombros en la cuenca de San Gabriel, para la construcción de mapas de susceptibilidad a inundación, herramientas fundamentales para la mitigación del impacto hacia las poblaciones expuestas.

Se realizó un análisis morfológico y edafológico de la cuenca hidrográfica del río Salsipuedes, así como un análisis espacio-temporal para el periodo 2014-2022 de uso de suelo en las 12 subcuencas que alimentan al río Salsipuedes, incluyendo una cuantificación de las zonas afectadas por los incendios ocurridos en mayo 2019. A partir de estos resultados se definió el índice de erodabilidad de las cuencas y cómo éste ha cambiado por procesos antrópicos asociados a la deforestación para el aprovechamiento de terrenos para cultivos de aguacate. Debido a la falta de datos de lluvia que dispararon el evento del 2 de junio de 2019, se realizó un análisis de la precipitación histórica durante el periodo de 1946 a 1991, con datos de la estación San Gabriel, para la definición de umbrales de lluvia con periodos de retorno de 5, 10, 15 y 20 años. Los periodos de retorno se definieron por la lluvia máxima acumulada en un día y por un intervalo de 3-5 días, escenario más común durante eventos hidrometeorológicos extremos.

Utilizando el código FLO 2D se realizaron simulaciones de lluvia-escorrentamiento para cada subcuenca. Los mapas de uso de suelo obtenidos para los años 2014, 2019 y 2022 se utilizaron para definir el Número de Curva de cada tipo de suelo y así considerar la infiltración en las simulaciones. Con base en

el análisis histórico de las lluvias, se consideraron 3 escenarios: 1) periodos de recurrencia de 5 años con la acumulación de 100 mm en 3-5 días, 2) periodo de recurrencia de 20 años con una lluvia de 150 mm en 3-5 días y 3) 90 mm de lluvia acumulada en 1 día, con periodo de retorno de 20 años. Las simulaciones permitieron definir: a) las características hidrológicas de cada subcuenca y cómo estas han cambiado durante el periodo 2014-2022 y b) el volumen de agua que cada subcuenca aporta al río Salsipuedes. Con los resultados se definieron las subcuencas cuya hidrogeología ha sufrido el mayor impacto por los cambios de uso de suelo y aquellas más susceptibles al aporte de sedimentos durante los escenarios de lluvia simulados. Por otro lado, las zonas afectadas por los incendios han sufrido un cambio repentino en las características de infiltración de las zonas afectadas, promoviendo un rápido escurrimiento del agua acumulada por la lluvia. Con base en la descarga (volumen de agua) calculadas, se establecieron curvas hidrográficas para la simulación de flujos de escombros con diferentes reologías para evaluar las zonas de posible inundación en el municipio de San Gabriel.

Como resultado se presenta un mapa de susceptibilidad a procesos erosivos, integrando la información de: erodabilidad, las zonas afectadas por los incendios, las características morfológicas de las cuencas, permitiendo la identificación de las subcuencas más expuestas a generar flujos de escombros en caso de eventos hidrometeorológicos extremos. Por otro lado, las simulaciones de flujos de escombros con periodos de retorno de 5-20 años permitieron obtener mapas de susceptibilidad a inundación para definir las posibles áreas de afectación en la zona urbana de San Gabriel, siendo las subcuencas en la parte topográficamente más alta las más susceptibles.

Los resultados del presente trabajo pueden ser utilizados para definir medidas de mitigación y de recuperación de las subcuencas más susceptibles a procesos erosivos y así limitar los daños en la población de San Gabriel durante la temporada de lluvia.

Capítulo 1: Introducción

Los flujos de escombros son mezclas saturadas de agua y sedimentos, que se desplazan a gran velocidad en pendientes inclinadas (Hungry, 2005). Son capaces de transportar grandes bloques y material en suspensión como troncos y recorrer grandes distancias, por lo que representan una amenaza para las poblaciones expuestas. El 2 de junio de 2019 en el municipio de San Gabriel, Jalisco, el desbordamiento del río Salsipuedes acompañado por el emplazamiento de flujos de escombros, provocó el fallecimiento de cinco personas, decenas de damnificados, daños en bienes materiales y vialidad. El evento ocurrió por lluvias intensas en la cuenca hidrográfica del río Salsipuedes que en semanas anteriores había sido afectada por grandes incendios, así como gran parte del Estado de Jalisco. Los flujos de escombros, con profundidades de más de 6 metros, bajaron por el canal que atraviesa el centro urbano, arrastrando gran cantidad de troncos que flotaban en su superficie.

En el 2019 se ha visto un incremento importante en el número y magnitud de incendios en la zona, tendencia común en varias partes del país y de Norte América (i.e. California) que, aun cuando hayan podido ser iniciados por actos dolosos, se han propagado de manera excepcional por las particulares condiciones climáticas y fuertes vientos. Existen estudios previos en donde se define que, dependiendo del tamaño del área afectada y de la duración del incendio forestal, las condiciones hidrológicas de las cuencas quedan afectadas, promoviendo procesos de erosión acompañadas de inundaciones severas que puede persistir durante años (Minshall *et al.*, 1989). La escorrentía y la erosión posteriores a los incendios dan como resultado la reducción en la protección de la cubierta del suelo, mediante la eliminación total o parcial de la vegetación, así como cambios en las propiedades físicas del suelo, como la estabilidad de los agregados y la infiltración del agua (Doerr *et al.*, 2006; Varela *et al.*, 2010).

El incremento en la ocurrencia de estos fenómenos, así como el potencial de peligro debido a los grandes volúmenes de material removilizado son motivos de estudio para explicar su dinámica y prevenir o mitigar los efectos negativos en escenarios futuros.

1.1 Planteamiento del problema

Los cambios de uso de suelo asociados a la deforestación para el aprovechamiento de terrenos de cultivos han ido en incremento en todo el país; en específico, en el Estado de Jalisco, se ha observado un incremento notable en los cultivos de aguacate, agave y frutos rojos (Instituto de Información Estadística y Geográfica de Jalisco, 2021). Estos cambios han modificado los patrones de infiltración

durante eventos de lluvias, y han modificado las condiciones de estabilidad de los suelos. Aunado a eso, los cambios en los patrones de lluvias y vientos asociados al cambio climático actual han promovido la propagación de incendios en los meses previos a la temporada de lluvia. En el 2019 el mismo Centro de Prevención de Desastres (CENAPRED) ha emitido una alerta de posibles inundaciones durante el inicio de la temporada de lluvia, en las zonas que habían sido severamente afectadas por incendios.

El evento ocurrido en el municipio de San Gabriel, representa uno de los pocos ejemplos reportados en México en los últimos años en áreas con estas características. En general, la ocurrencia de flujos de escombros es bastante común durante la temporada de lluvia. Sin embargo, el evento que se propone estudiar en el presente trabajo permitirá entender mejor la susceptibilidad a procesos de remoción en masa en áreas afectadas por incendios en donde, además, los cambios de uso de suelo (e.g., la transformación de bosques por cultivos en áreas altas y terrenos complejos) han sido intensos en el área de trabajo. A partir de los datos obtenidos por el presente estudio, se podrá establecer una metodología de trabajo para estimar la susceptibilidad a la formación de flujos de escombros durante eventos hidrometeorológicos extremos, en localidades previamente afectadas por incendios y cambios en uso de suelo, para el caso particular de San Gabriel.

1.2 Justificación

A la fecha existen numerosos estudios (Wieczorek, G. y Glade, T. 2005; Kean, J. y Staley, D. 2021; Murphy *et al.*, 2019; Melo, R. y Zezere J. 2017) que muestran el incremento de procesos erosivos durante lluvias intensas en laderas afectadas por incendios, con la formación de flujos de escombros que en los últimos años han provocado daños y pérdidas humanas. Considerando además el progresivo cambio de uso de suelo para la ampliación de superficies para el cultivo, la combinación de deforestación e incendios, son dos fenómenos que han hecho más susceptibles los relieves a ser afectados por procesos de remoción en masa, con consecuencia directa a las poblaciones expuestas. Por lo anterior, es de fundamental importancia mejorar el conocimiento acerca de estos fenómenos y establecer metodologías de trabajo que permitan definir las características del fenómeno y proponer medidas de mitigación.

1.3 Hipótesis

Los procesos de remoción en masa son frecuentes en laderas con pendientes mayores a los 15° y son comúnmente disparados por eventos de lluvias de alta intensidad. Cambios de uso de suelo por deforestación a favor de cultivos intensivos modifican la estabilidad de las laderas, así como la capacidad de infiltración, incrementando así los escurrimientos superficiales. Los incendios forestales, además de destruir las raíces y provocar la caída de árboles, producen la acumulación de ceniza en los suelos, reduciendo la capacidad de infiltración del agua al principio de un evento de lluvia, y promoviendo procesos de escorrentía superficial. La combinación de los procesos antes descritos hace a una ladera altamente susceptible a procesos de remoción en masa durante eventos de lluvia, con la removilización de gran cantidad de sedimento y la formación de flujos de escombros cuyo impacto puede generar daños y pérdidas humanas. El evento observado en la localidad de San Gabriel puede volver a ocurrir en la misma cuenca hidrográfica, así como en otras cuencas con las mismas características.

1.4 Objetivos

Objetivo General:

Identificar los factores que propician la formación de flujos de escombros en la cuenca San Gabriel, Jalisco.

Objetivos Particulares:

- Estudio de las características del flujo de escombros emplazado en la cabecera municipal de San Gabriel Jalisco, el 2 de junio de 2019.
- Análisis espacio temporal del cambio de uso de suelo en el área de estudio.
- Análisis de imágenes satelitales para la identificación de la zona afectada por el incendio y por el emplazamiento del flujo.
- Análisis climatológico del área de estudio (histórico de lluvias).
- Trabajo de campo para determinar la zona fuente de este evento y definir las características litológicas, tipo de suelos y de vegetación o cultivo en la región afectada.
- Caracterización de los tipos de suelos que afloran en el área de estudio.
- Definición hidrogeológica de la cuenca del río Salsipuedes.

- Modelado numérico con el código FLO-2D para reproducir los alcances del flujo de escombros ocurrido el 2 de junio del 2019.
- Realización de un mapa de susceptibilidad por flujos de escombros en el área de estudio.

Capítulo 2. Marco Teórico

Los flujos de escombros son mezclas de agua y sedimento que descienden a lo largo de una pendiente (Pierson y Costa, 1997). Son flujos gravitacionales constituidos por fragmentos líticos (entre el 60-90% del volumen total) transportados por una fase fluida de agua y lodo (limo y arcilla). Son considerados como fluidos no-Newtonianos, caracterizados por un límite plástico y una relación no lineal entre el esfuerzo cortante y la tasa de deformación.

Este tipo de flujos se clasifican en cohesivos y no cohesivos: **1. Cohesivos:** contienen más de 3-5% de arcilla, lo que confiere una cohesión al flujo que permite transportarse sobre grandes distancias manteniendo su contenido en fracción sólida, los flujos cohesivos se forman por la transformación directa de una avalancha, que involucra a un sector de un edificio volcánico alterado por la actividad hidrotermal, en presencia de una cantidad de agua suficiente capaz de saturar el material colapsado (Carrasco-Núñez et al., 1993; Vallance, 2000).

2. No cohesivos: contienen menos del 3-5% de arcilla, por falta de cohesión sufren de manera más rápida una selección gravitacional de la fracción sólida con una consecuente transformación hacia flujos hiperconcentrados, flujos con un contenido de sedimentos de 20-60% en volumen total. Esto se debe por la incorporación progresiva de material acumulado en las laderas del volcán, por flujos de agua intensos (Vallance, 2000). La clasificación entre un tipo de flujo y otro depende de la distribución granulométrica, el tipo de arcilla presente y de su grado de dispersión (Pierson y Costa, 1987).

2.1 Origen de los flujos de escombros

Los flujos de escombros se definen como un proceso de remoción en masa, derivado de la inestabilidad de una ladera y disparado por un sismo o por lluvias abundantes. Pueden originarse por la transformación del deslizamiento de una masa saturada o parcialmente saturada de agua, o por procesos progresivos de erosión superficial y subsuperficial por escurrimiento de agua (Iverson et al., 1997).

Su formación es más común en pendientes mayores a 15°, donde el agua es el factor principal detonante, generalmente asociada a lluvias abundantes durante temporadas de precipitación, o a derretimiento de glaciares en ambientes alpinos en el verano. Además del tipo de litología, el tipo de

suelo y vegetación juegan un papel fundamental en controlar los procesos de infiltración y escurrimiento que eventualmente pueden llevar a desestabilizar la ladera y su posterior colapso, (Figura 1).

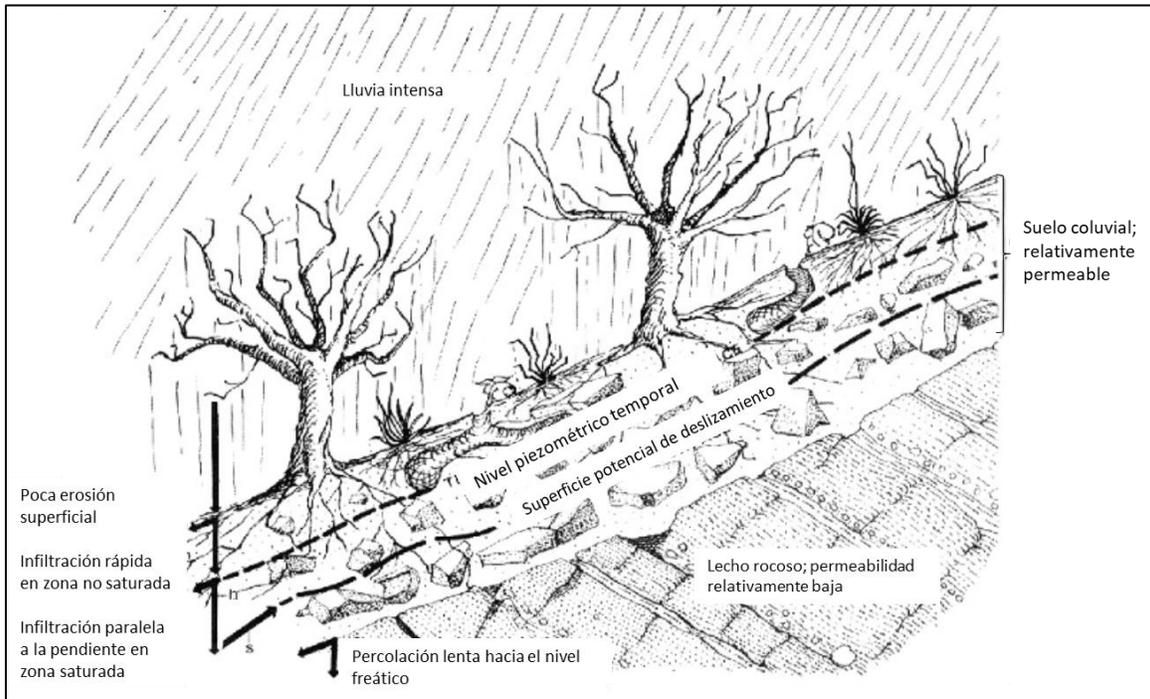


Figura 1: Modelo conceptual para lluvias intensas, infiltración y acuíferos temporales en laderas poco profundas (Campbell, 1975).

La permeabilidad y la estabilidad de los suelos puede estar afectada por la ocurrencia de incendios. Los incendios aumentan sustancialmente la susceptibilidad de pendientes pronunciadas a la formación de flujos de escombros, que pueden causar daños a la población y a sus propiedades (Cannon y DeGraff, 2009; Lin et al., 2012; Lukashov et al., 2019).

El suelo después de un incendio es susceptible a sufrir erosión, ya que queda expuesto a la acción del viento y del agua (Caon 2014; Shakesby, 2011). Además, la presencia de ceniza induce al fenómeno de hidrofobicidad, lo que promueve el escurrimiento superficial, la erosión y la progresiva formación de flujos de escombros. El incendio puede provocar la pérdida de árboles y su sistema radical, reduciendo así la capacidad de infiltración de los suelos (Estrada, 2019).

2.2 Características de los flujos de escombros

Los flujos de escombros se mueven generalmente como una secuencia de pulsos, cada uno de ellos caracterizados por diferentes partes. Los intervalos de tiempo entre la formación de estos pulsos pueden variar de segundos a horas (Caballero, 2012). En una sección longitudinal ideal, los flujos se pueden dividir en cabeza, cuerpo y cola (Pierson, 1986; Takahashi, 1991).

Cabeza o frente: Tienen una alta concentración de material grueso que se acumula al frente y en los márgenes del flujo, generando resistencia al movimiento y provocando su depósito. En ocasiones esta parte se mueve con una velocidad ligeramente inferior al resto del flujo (Sarocchi, 2006). **Cuerpo:** parte en la cual el flujo se encuentra totalmente desarrollado, constituido por una mezcla homogénea de la fase fluida y los fragmentos sólidos en un estado de licuefacción, con una elevada movilidad. En el cuerpo se pueden originar frentes secundarios. **Cola:** caracterizada por la disminución en la concentración de los sedimentos que puede dar lugar a un flujo hiperconcentrado y puede desarrollar turbulencia (Pierson y Scott, 1985; Pierson y Costa, 1987), (Figura 2).

La velocidad de un flujo de escombros no es uniforme, el frente o cabeza viaja a menor velocidad que el cuerpo, pero pueden alcanzar velocidades de hasta 150 km/hr (Pierson, 1998); la velocidad máxima se concentra en la parte medio-frontal del flujo y la velocidad mínima hacia el contacto con las paredes del canal. Los factores que controlan esta velocidad son: la profundidad del flujo, el grado de pendiente, la concentración de la parte sólida (Caballero y Capra, 2018). La descarga depende de la velocidad y espesor (área transversal) y varía hasta cientos a miles de m^3/s , valores máximos que han sido estimados para eventos catastróficos asociados a colapsos de edificios volcánicos (Vallance y Scott, 1997).

Los flujos de escombros cohesivos son de volumen mayor que generalmente se mantiene constante por distancias largas. En cambio, los flujos no cohesivos presentan un volumen inicialmente pequeño, pero puede ir incrementando hasta 15-20 veces a lo largo de su recorrido (Pierson, 1995).

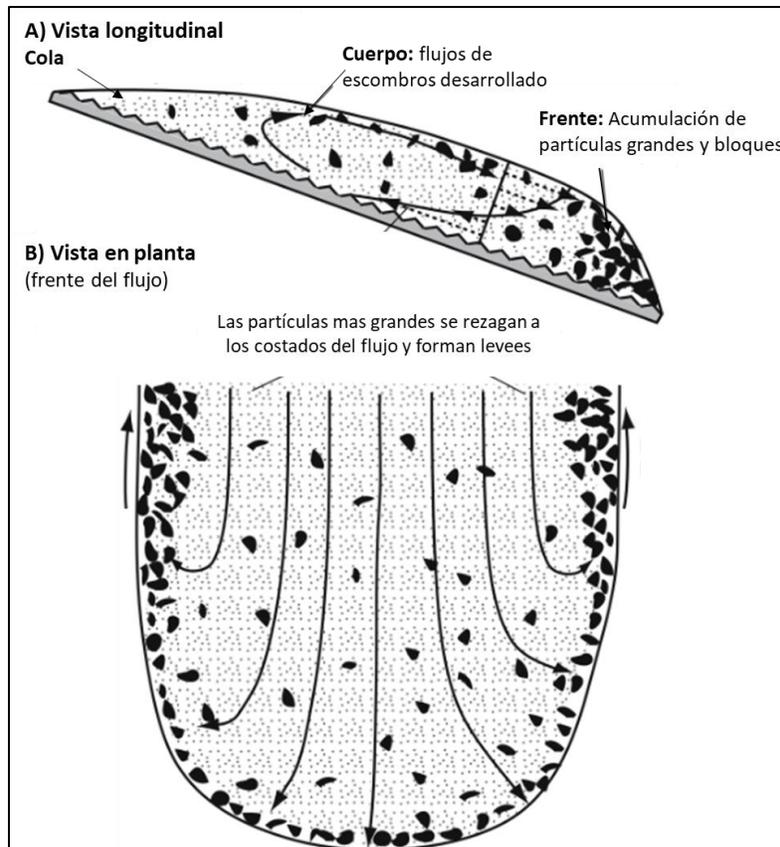


Figura 2: Esquema que muestra una vista de lado y de planta, las partes de un flujo de escombros: cabeza, cuerpo y cola (Vallance, 2005).

2.3 Depósitos

En zonas de baja pendiente los flujos forman lóbulos con frentes y márgenes escarpados, mientras que, en las paredes del canal, se identifican crestas compuestas por una mezcla de material grueso y fino de forma paralela al flujo (levees). Al disminuir la pendiente ($10 - 12^\circ$) los flujos de escombros inician a depositar de manera progresiva el material formando diferentes unidades disposicionales con diferente textura dependiendo de las fluctuaciones en la descarga y en el volumen de la fracción sólida (Curry, 1996; Vallance y Scott, 1997; Pierson y Scott, 1998).

Los depósitos característicos de los flujos de escombros son muy o poco consolidados dependiendo de sus características ya sean cohesivos o no cohesivos (Pierson y Scott, 1985). Son masivos, y los clastos pueden variar de angulosos a subredondeados, soportados por una matriz arenosa con proporciones variables de limos y arcilla.

Los depósitos de flujos de escombros pueden presentar una gradación normal debido a la acción de la gravedad y a la sedimentación de partículas gruesas durante el transporte. También puede ser resultado de la depositación por partes, empezando por la cabeza (fracción gruesa) y terminando con la cola del flujo (granos finos), (Vallance y Scott, 1997). La gradación inversa se forma cuando el flujo es diluido y compuesto por partículas finas incrementando su descarga y se convierte en un flujo compuesto por partículas de mayor diámetro (Pierson y Scott, 1985). También se pueden encontrar grandes bloques suspendidos hacia la superficie.

Texturalmente, los depósitos presentan soporte de matriz, o soporte clasto a clasto, la distribución granulométrica es bimodal o multimodal. El contacto entre los flujos de escombros y los materiales subyacentes tienden a estar bien definidos (Costa, 1984). Los clastos pueden presentar dimensiones variadas, de pocas micras hasta diez metros (Costa, 1988), los cuales están mal clasificados.

2.4 Reología de los flujos de escombros

Los flujos de escombros son sistemas complejos, no estacionarios y no uniformes, en donde la reología presente en los flujos de escombros está dada por la concentración de los sedimentos y por la granulometría de las partículas. La viscosidad controla el comportamiento del flujo cuando el contenido de fracciones finas (limo y arcilla) y su resistencia al corte es alta (Bagnold, 1954).

La reología que presentan los flujos de escombros corresponde a un comportamiento viscoplástico (Costa, 1988). Dependiendo de la granulometría y contenido en la fracción limo-arcillosa, pueden variar de flujos viscosos a inerciales (Scott et al., 1995).

Los flujos de escombros se mueven generalmente de manera laminar, y el transporte y suspensión de los grandes clastos es debido a una densidad alta y un esfuerzo de cizalla grande (Johnson, 1970). En algunos casos los flujos pueden ser localmente turbulentos debido a las irregularidades del suelo y a la alta velocidad (Caballero, 2012). Los mecanismos que transportan a las partículas son por medio de deslizamiento, rodamiento, saltación y suspensión. El transporte por rodamiento se presenta generalmente en bloques de mayor tamaño, mientras que el transporte debido a la saltación y suspensión se presenta en partículas más pequeñas.

2.5 Erosión de los flujos

A lo largo de la trayectoria de un flujo de escombros, es común que el comportamiento vaya cambiando, debido a que generalmente erosionan sedimentos en pendientes abruptas o se juntan con drenajes laterales con mayor aporte de agua. Estos cambios determinan un cambio en la concentración de sedimentos que se definen como procesos de bulking o debulking. Estas transformaciones aparecen al frente del fluido y migran hacia la parte posterior, conforme se desplaza cuesta abajo (Fisher, 1983). La capacidad erosiva dependerá de la densidad del fluido, la profundidad y el esfuerzo de cizalla sobre la base del canal.

Bulking: es un proceso de incorporación de material por erosión durante el transporte. Este proceso provoca un aumento en el volumen del propio flujo (Scott, 1998) y está relacionado con las características del lecho del canal y el volumen de sedimentos disponibles en el cauce. **Debulking:** proceso de dilución que ocurre mediante la incorporación gradual de agua en el frente del flujo o por pérdida progresiva de la fracción sólida (Pierson y Scott, 1985).

Capítulo 3. Zona de estudio

La zona de estudio se encuentra al sur del estado de Jalisco, en el municipio conocido como San Gabriel. La cuenca de interés se obtuvo a partir de un Modelo Digital de Elevación (MDE) de 12.5 m de resolución (Alos-Palsar), a través de Alaska Satellite Facility. La cuenca San Gabriel cuenta con un área de 177.83 km², presentando alturas de 1260 msnm en la parte oeste hasta los 1680 msnm en la parte este. Dentro de la cuenca se encuentran dos localidades, que son la cabecera municipal de San Gabriel con 4606 habitantes y el poblado de Apango con 683 habitantes (INEGI, 2010). Respecto a la hidrología, la corriente de mayor orden es el río Salsipuedes que atraviesa la parte central de la cuenca, hacia el cual drenan los demás drenajes secundarios como se observa en la Figura 3.

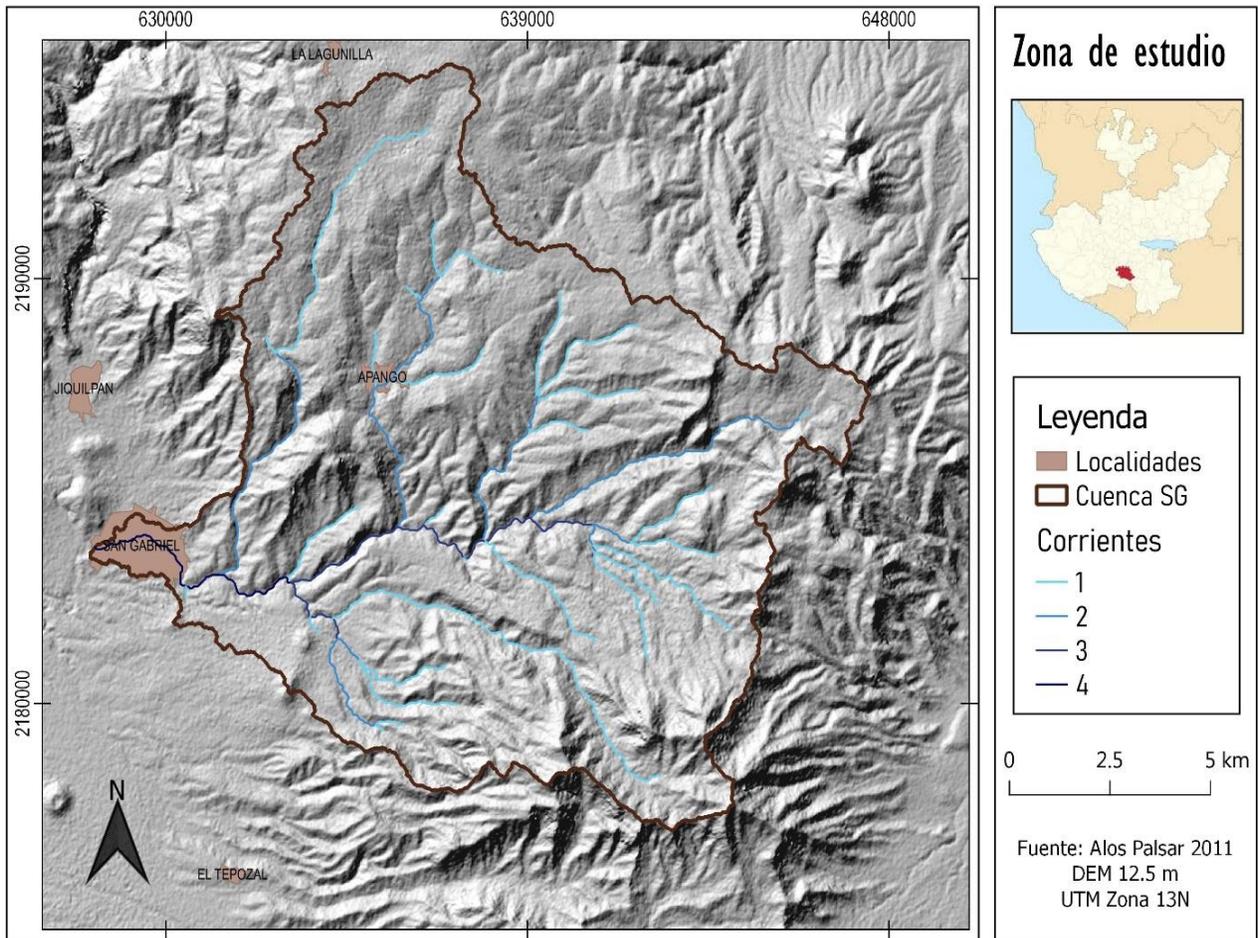


Figura 3: Ubicación geográfica de la cuenca San Gabriel, al sur del estado de Jalisco.

3.1 Clima

En este municipio pueden considerarse dos tipos de clima principales, semihúmedo y semicálido. La temperatura media anual es de 20.3°C, mientras que las temperaturas máximas y mínimas promedio oscilan entre 29°C y 7°C respectivamente, siendo el mes de junio cuando se registran las temperaturas más elevadas y el mes de enero las más frías (CONABIO, 2012).

Con una precipitación media anual de 740 mm, con régimen de lluvia en los meses de junio, julio y agosto principalmente. Los vientos dominantes soplan en dirección suroeste (Gobierno del estado de Jalisco).

3.2 Vegetación

Las zonas boscosas se encuentran cubiertas de pino y encino. En las partes más bajas se encuentra vegetación llamada selva baja, con especies como palo dulce y huisache. La superficie de vegetación corresponde a una vegetación arbórea primaria, y en menor superficie (6.6%) a la vegetación arbórea secundaria. En la zona de estudio se desarrollan: bosques de coníferas, bosque mesófilo de montaña, selva caducifolia, palmar natural y vegetación hidrófila (Datos vectoriales de suelo y vegetación, INEGI 2016).

3.3 Suelos

El suelo predominante es el Regosol (33.2%) y el de tipo Andosol, son someros con fertilidad variable y su productividad se relaciona con su profundidad y pedregosidad y a litosol como suelo asociado (Instituto de Información Estadística y Geográfica Jalisco). La agricultura de temporal anual es el uso dominante en este municipio.

3.4 Evento del 2019, San Gabriel, Jalisco

En la tarde del domingo 2 de junio de 2019 el municipio de San Gabriel, Jalisco fue afectado por el emplazamiento de un flujo de escombros, disparado por la ocurrencia de lluvias intensas en la cuenca hidrográfica del río Salsipuedes que, en semanas anteriores había sido afectada por grandes incendios. De los videos tomados por algunos testigos se observa un flujo confinado en el canal principal que drena hacia la comunidad de San Gabriel, con un importante volumen de troncos quemados en el frente del flujo y flotando en su cima. Por los reportes, en el pueblo no se registró lluvia, pero tampoco se cuenta con datos de la lluvia acumulada en la parte alta de la cuenca en donde se inició el proceso.

Con base en imágenes y videos del evento reportados por noticieros y periódicos, se puede inferir que los flujos de escombros con hasta 6 metros de profundidad descendieron por el canal que atraviesa el centro urbano, arrastrando gran cantidad de troncos en superficie (Figura 4: tomado de videos). De las mismas imágenes del video, se puede observar que el flujo no dejó grandes fragmentos de rocas, y el material depositado tiene una granulometría entre la grava y la arena. El evento provocó la muerte de cinco personas, 3000 damnificados, y daños en bienes materiales y vialidad. Se adquirieron 2 imágenes satelitales Sentinel-2 con fechas de: junio 2019, antes del evento y 2 de julio de 2019, después del evento, en la figura 5B se puede observar la zona inundada que dejó el flujo de escombros, en el poblado de San Gabriel.





Figura 4: Imágenes que muestran los depósitos y marcas de la altura del flujo de escombros en el poblado de San Gabriel, con profundidades de hasta 6 m desde la base del canal (imágenes de videos reportados por noticieros y periódicos INFORMAFOR.MX).

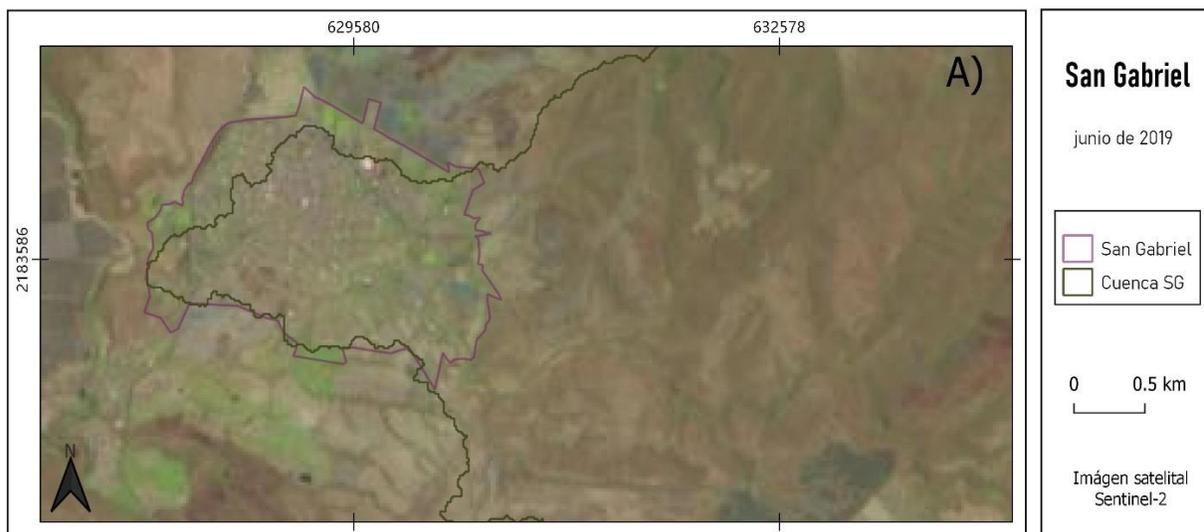




Figura 5: Imágenes satelitales Sentinel-2 para la identificación de la zona inundada por el flujo de escombro con fechas de: A) junio 2019 (antes del evento) y B) 2 de julio de 2019 (día del evento).

Capítulo 4. Metodología

El diagrama de la figura 6 muestra de manera esquemática la metodología del trabajo utilizada. A continuación, se describen las diferentes etapas.

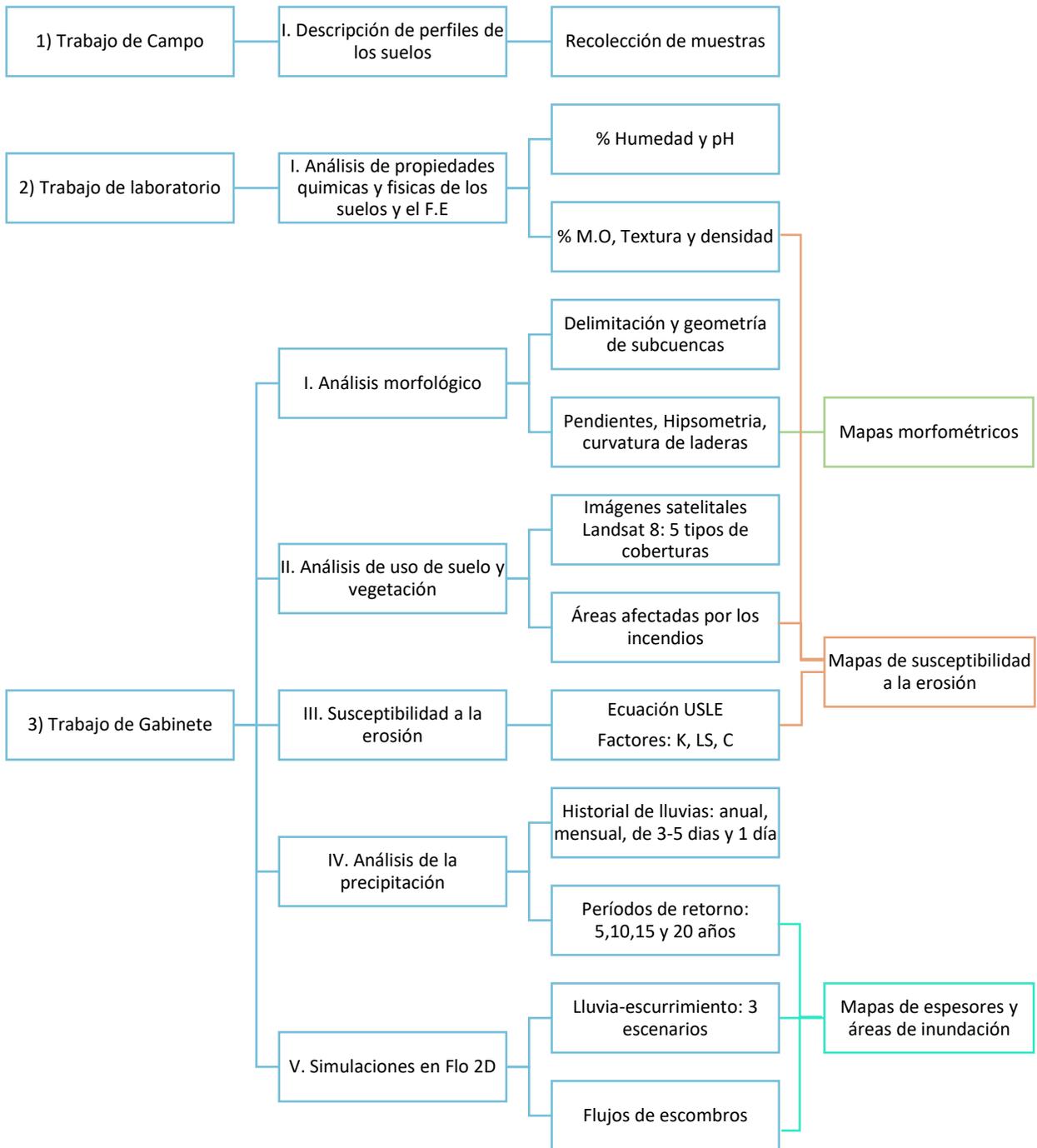


Figura 6: Esquema de la metodología que se empleó en este trabajo; F.E: flujo de escombros.

4.1. Análisis morfológico

Se realizó un análisis morfológico con el fin de caracterizar la cuenca principal y las diferentes subcuencas en la zona de estudio, como son: las pendientes, la hipsometría, el área y perímetro, el orden de la red hidrológica, orientación de laderas. La geometría de las cuencas se obtuvo a través del índice de Gravelius K_G (Gravelius, 1914; Bendjoudi y Hubert 2002) el cual define la relación entre el perímetro de una cuenca (P) y su superficie (A), siguiendo la ecuación 1.

$$K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} \quad [1]$$

Para obtener la hidrología en la zona de estudio, se empleó el orden de las corrientes, que es el grado de bifurcación dentro de la cuenca. Se utilizó el método de Strahler (1964), en este método se asigna un orden de 1 a todos los arroyos sin afluentes, conocidos como arroyos de primer orden. Cuando dos arroyos del mismo orden intersecan, su clasificación aumenta; así el arroyo que se forma por unión de dos afluentes de primer orden será un arroyo de segundo orden, la intersección de dos arroyos de segundo orden creará un arroyo de tercer orden, y así sucesivamente. Los diferentes mapas se realizaron utilizando Qgis 2.1816.

4.2. Cambio de Uso de Suelo y Vegetación

Según sean las condiciones del terreno como el tipo y el uso del suelo, los procesos de infiltración o retención del agua pluvial pueden ser muy variables. Así mismo, la ausencia o presencia de vegetación por cambio de usos de suelo puede favorecer la inestabilidad de laderas, desencadenando procesos de remoción en masa (Bakker et al., 2008).

Para reconocer el uso de suelo y vegetación en la cuenca de San Gabriel, se empleó una imagen satelital reciente del año 2022 de Google Earth, en donde se pudieron identificar áreas correspondientes a: cultivos, suelos desnudos, carreteras, vegetación presente, etc. Posteriormente se definieron cinco categorías de uso de suelo: 1. Zonas urbanas, 2. Cultivos de aguacate, 3. Cultivos varios, 4. Vegetación natural y 5. Suelos desnudos. De la imagen se extrajeron un total de 30 puntos de control y para cada uno se definió su tipo de uso de suelo y sus respectivas coordenadas.

Posteriormente, para la obtención del mapa de uso de suelo del área de estudio, se obtuvo una imagen satelital de Landsat 8, con fecha 11 de febrero de 2022 a través de Earth Explorer. Con la herramienta Maximum Likelihood Classification de ArcGIS 10.8, se clasificó la imagen utilizando los puntos

previamente definidos por cada una de las cinco categorías de uso de suelo. Esta herramienta combina la base de datos y la imagen satelital para definir la respuesta experta en los puntos de muestreo, para extender la clasificación de la imagen en las cinco categorías.

Para poder establecer una relación entre la formación de procesos superficiales y la modificación de la cobertura se realizó un análisis espacio-temporal de cambio de uso de suelos en un periodo de tiempo de 2014 al 2022 en la cuenca San Gabriel. Para ello se aplicó la misma metodología antes descrita a imágenes satelitales Landsat 8 con una resolución de 30 metros, correspondientes a los años 2014 (fecha más antigua), 2019 (año del evento) y 2022 (fecha actual). Se establecieron las mismas coberturas y usos: 1. Zonas urbanas, 2. Cultivos de aguacate, 3. Cultivos varios, 4. Vegetación natural y 5. Suelos desnudos.

4.3 Trabajo de campo

Se efectuó el trabajo de campo para la descripción y muestreo de los diferentes tipos de suelos identificados en la zona, así como para la identificación de eventos de flujos de escombros históricos. En total se recolectaron 16 muestras (Figura 7).

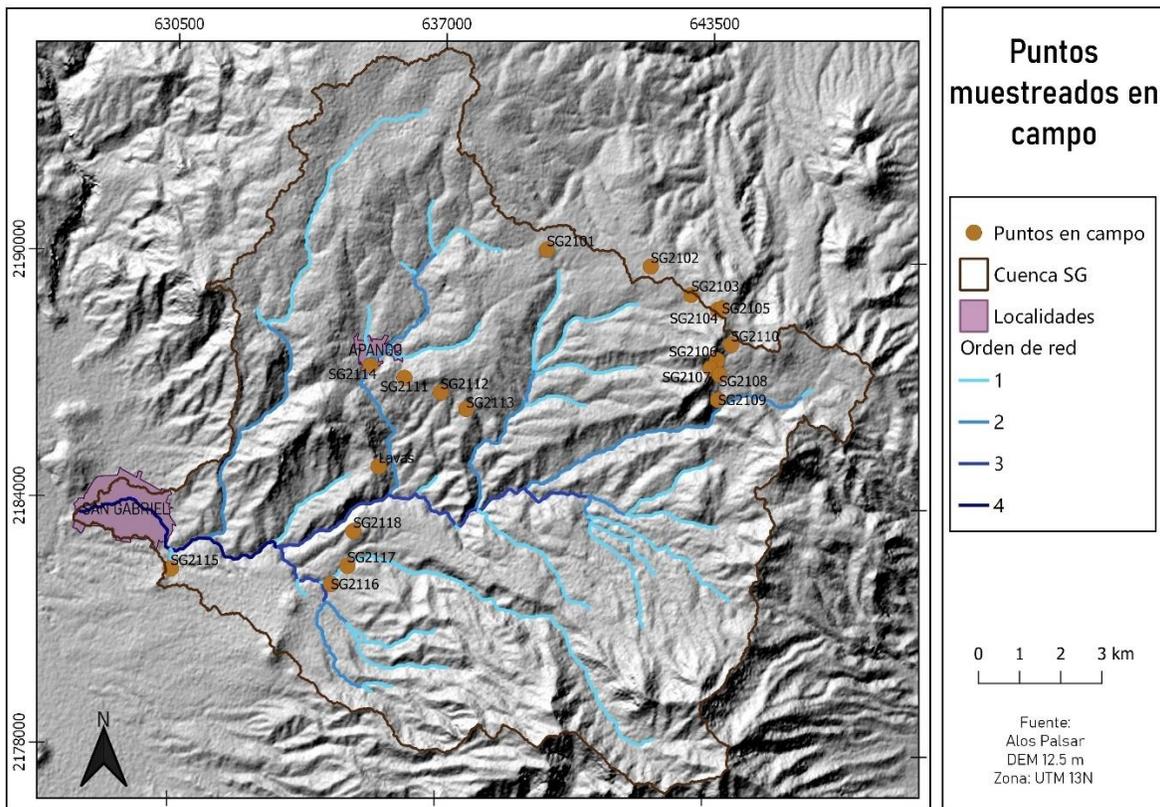


Figura 7: Mapa que muestra la localización de los depósitos y suelos analizados en el trabajo de campo en la cuenca San Gabriel, Jalisco.

4.4 Trabajo de laboratorio

Se analizaron las muestras de suelo obtenidas en campo, con el propósito de obtener propiedades químicas y físicas de los suelos. Los análisis se realizaron en el laboratorio de Edafología del Centro de Geociencias. A continuación, se describe el procedimiento de las metodologías analíticas utilizadas.

4.4.1 Porcentaje de Humedad

El contenido de agua en el suelo es variable debido a las distintas capacidades de retención de agua. Este parámetro se relaciona directamente con las propiedades físicas del suelo que a su vez afectan al desarrollo de la vegetación. Cuantificar su contenido nos permite conocer el agua disponible en los poros. Los métodos para determinar la humedad pueden ser directos o indirectos. Los directos eliminan el agua por evaporación, en los indirectos se mide alguna propiedad física o química afectada por el contenido de humedad.

Los **materiales** que se utilizaron fueron: recipientes de aluminio, balanza analítica, horno (Figura 8).

Procedimiento: Se pesaron en la balanza los recipientes de aluminio sin muestra (peso del recipiente); posteriormente se repitió la medición con una cucharada de la muestra del suelo recién sacado de la bolsa utilizada para el muestreo, obteniendo el peso (A). El procedimiento se repitió para todas las muestras. Posteriormente se introducen en el horno a 150 °C, durante 24 horas, una vez enfriados se pesa en la balanza analítica y se obtiene el peso (B). Entonces el contenido de humedad se calcula de la siguiente manera:

$$\% \text{ Humedad } (\%w) = \frac{A - B}{B - \text{peso del recipiente}} \times 100 \quad [2]$$

$$f(\text{factor de corrección de humedad}) = \frac{100 + \% \text{ humedad}}{100} \quad [3]$$



Figura 8: Materiales empleados para la obtención del porcentaje de Humedad: balanza analítica y recipientes de aluminio.

4.4.2 pH

El pH es una de las mediciones más importantes en los análisis de los suelos, ya que controla reacciones químicas y biológicas. La determinación del pH es afectada por varios factores como: el tipo y cantidad de constituyentes orgánicos e inorgánicos que contribuyen a la acidez del suelo, la concentración de sales en la solución. Dependiendo del valor de pH las soluciones se clasifican en:

Tabla 1: Clasificación de soluciones según su pH (Manual de laboratorio, Edafología).

Tipo	pH
Fuertemente ácido	< 5.0
Moderadamente ácido	5.1- 6.5
Neutro	6.6 -7.3
Medianamente alcalino	7.4 – 8.5
Fuertemente alcalino	> 8.5

Material: Frascos de vidrio (Gerber), probeta para rellenar con agua destilada de 50 ml. Para medir el pH se utilizó el potenciómetro marca Beckman 390 pH (Figura 9).

Procedimiento: Se coloca en los frascos de vidrio 10 gramos de la muestra del suelo, agregándole 25 ml de agua destilada utilizando la probeta de 50 ml. Posteriormente se mezcla esta solución con ayuda del mezclador Junior Orbit Shaker durante una hora, dejando reposar durante unos minutos las muestras. Una vez transcurrido este tiempo se procede a utilizar el potenciómetro, introduciendo el frasco de vidrio en el equipo, procurando que esté cubierta completamente por la muestra. El equipo determinará el valor de pH correspondiente.



Figura 9: Materiales utilizados para la medición del pH en cada muestra.

4.4.3 Materia orgánica

La materia orgánica del suelo corresponde a los productos orgánicos en descomposición que atraviesan la malla de 2 mm. Es importante para la fertilidad del suelo ya que puede almacenar nutrientes, conservar la humedad del suelo y favorecer su estructura. Intervienen en el complejo de intercambio catiónico fijando cationes y liberándolos gradualmente a través de la mineralización. Su descomposición genera el llamado humus, procesos en que intervienen los microorganismos liberando nutrientes para plantas y animales. El método más utilizado para cuantificar la materia orgánica (M.O.) es a través de la determinación del % del carbono orgánico (producto de la descomposición de compuestos orgánicos), (Tabla 2).

Para determinar el contenido de materia orgánica se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$\% C \text{ orgánico} = \frac{B - T}{g} (N)(0.399)fch \quad [4]$$

Donde:

B=volumen de sulfato ferroso gastado para valorar el blanco (ml)

T= volumen de sulfato ferroso gastado para valorar la muestra (ml)

N= normalidad exacta del sulfato ferroso utilizado

g= gramos de muestra empleados (g)

fch= factor de corrección de humedad

La conversión de %C orgánico a % de MO es:

$$\% MO = \%C * 0.794 \quad [5]$$

Tabla 2: Clasificación de los suelos según el contenido de materia orgánica (Valores de referencia de la NOM-021-SEMARNAT-2000).

%Materia orgánica		
Clasificación	Suelos volcánicos	Suelos no volcánicos
Muy bajo	< 4.0	< 0.5
Bajo	4.1 - 6.0	0.6 - 1.5
Medio	6.1 - 10.9	1.6 - 3.5
Alto	11.0 - 16.0	3.6 - 6.0
Muy alto	> 16.1	> 6.0

Materiales: Matraz Erlenmeyer de 250 ml, probeta de 10 ml, balanza analítica, campana de extracción, solución de Dicromato de Potasio, solución de sulfato ferroso, ácido sulfúrico concentrado, ácido fosfórico concentrado, Barisulfato de difenilamina, agua destilada (Figura 10).

Procedimiento: La muestra del suelo debe estar previamente tamizada en una malla de 0.25 mm, para posteriormente pesar 0.25 gramos del suelo en la balanza analítica de precisión de 0.0001 g y colocarlo en el matraz de 250 ml. Adicionar a las muestras 10 ml de solución de Dicromato de Potasio, mezclando bien, se le agregan también 20 ml de ácido sulfúrico concentrado, dentro de una campana de extracción. Se debe mezclar muy bien la solución y dejar reposar durante 30 minutos, después de este tiempo, se le agrega 100 ml de agua destilada. Se continúa agregando 10 ml de ácido fosfórico concentrado y 10 gotas (1 ml) del indicador Barisulfato de Difenilamina. Finalmente se realiza la titulación con la solución de sulfato ferroso, gota a gota hasta que la solución vire a un color verde esmeralda. Este mismo procedimiento debe efectuarse para realizar un blanco, es decir *sin* muestra del suelo, para determinar la normalidad real del sulfato ferroso.



Figura 10: Materiales requeridos para la obtención de valores de la Materia Orgánica para las muestras.

4.4.4 Textura

El suelo está formado por grupos de partículas definidas por su tamaño que imparten al suelo características específicas y que se conocen de manera general como partículas gruesas y finas. Estas partículas están definidas por grupos: arenas, limos y arcillas y cada una en fracciones (arena fina, arena media, fina; limo grueso, medio, fino, etc.). Las partículas del suelo se separan de acuerdo con su comportamiento en una suspensión acuosa, ya que en el agua caen por efecto de la gravedad a distinta velocidad, lo que se relaciona con el tamaño y densidad de la partícula.

Materiales: Balanza, batidora con vasos, Hidrómetro de Bouyoucos, agitador, probeta de 1 litro, agua destilada, Peróxido de Hidrógeno al 30% (Figura 11).

Procedimiento: Pesar 20 g de cada muestra de suelo y colocarlo en un vaso de precipitados. Posteriormente agregar 10 ml de peróxido de hidrógeno. Se debe esperar que la efervescencia cese y agregar nuevamente 10 ml de peróxido, dejando reposar la suspensión durante 24 horas aprox. Estas soluciones se colocan en la batidora para mezclarlas muy bien durante 20 minutos, después de este tiempo transcurrido se colocan las soluciones en las probetas, agregándoles agua destilada hasta cumplir con el volumen de 1 litro, agitando nuevamente para mezclar bien. Con ayuda del hidrómetro de Bouyoucos se introduce en la probeta y se realizan las lecturas correspondientes a diferentes tiempos: a los 40 segundos, 1 minuto, 10 minutos, 1 hora, 2 horas y 24 horas. Límites que han sido establecidos por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA).

Con el resultado de estas lecturas se realizan los siguientes cálculos para determinar el porcentaje de arenas, limos y arcillas: la lectura a los 40 segundos multiplicada por 2, es igual al porcentaje de arcilla más limo; restando del 100% se obtiene el porcentaje de arena. La lectura obtenida a 2 horas multiplicada por 2 es igual al porcentaje de arcilla, finalmente el porcentaje de limo se obtiene por diferencia.





Figura 11: Materiales empleados para conocer la textura de los suelos analizados: probetas, Hidrómetro de Bouyoucos y batidoras.

4.4.5 Densidad real

La densidad real se refiere a la densidad de las partículas sólidas del suelo. Se expresa como la relación de la masa total de las partículas sólidas y su volumen total, excluyendo los espacios que ocupan los poros entre ellas. La densidad real del suelo depende de la composición química, mineralógica, y el grado de hidratación de las partículas. La densidad de las partículas del suelo se calcula a partir de las mediciones cuantitativas de su masa y su volumen.

La masa se determina por medio del peso y el volumen partiendo de la masa y la densidad del agua (u otro fluido) desplazado por la muestra.

$$Densidad\ real\ (ps) = \frac{ps}{vs} \quad [6]$$

$$ps = (2) - (1) \quad [7]$$

$$vs = \frac{(4) - (1)}{pw} - \frac{(3) - (2)}{pw} \quad [8]$$

Donde:

ps= peso de las partículas del suelo

vs= volumen de las partículas del suelo

pw= densidad del agua

Materiales: Picnómetros, desecador de vacío, balanza analítica y embudo de plástico. Agua destilada, peróxido de Hidrógeno (Figura 12).

Procedimiento: Pesar 12 gr de suelo seco en un vaso de precipitado, para eliminar la materia orgánica se le debe colocar a la muestra 10 ml de peróxido de Hidrógeno y esperar a que cese la reacción de esta solución. Colocar el vaso en una parrilla y calentarlo para eliminar el exceso de peróxido. Se prosigue a lavar los picnómetros y colocarlos en la estufa a 40° C por 2 horas para tener un peso constante. Se pesa el picnómetro junto con el tapón, esto equivale al peso (1).

Colocar en el interior del picnómetro 5 gr de suelo previamente tratado, usando el embudo de plástico, pesar el picnómetro más el suelo, lo que corresponde al peso (2). Agregar hasta la mitad del volumen del picnómetro agua destilada, girándolo entre los dedos con suavidad y colocarlo en el desecador por varios minutos. Pasado este tiempo llenar hasta aforo con agua destilada y pesarlo en la balanza, este peso corresponde al número (3). Vaciar el picnómetro, enjuagarlo perfectamente y llenarlo hasta el aforo solo con agua destilada, lo que equivale al peso (4).



Figura 12: Materiales utilizados para la obtención de la densidad real de los agregados del suelo.

4.5 Análisis de susceptibilidad a la erosión

La erosión es uno de los procesos más intensos de degradación del suelo, ya que influye en la pérdida de nutrientes y de materia orgánica, resultando en una disminución de la infiltración y el incremento de la escorrentía (Pimentel et al., 1995; Bakker et al., 2008 y Yang et al., 2003). El material derivado de este proceso puede ser transportado por flujos de agua y formar flujos con altas concentraciones de sedimentos (Hook y Sandercock, 2017). Para conocer la susceptibilidad a la erosión presente en una zona de estudio se utilizó la formula [9] basada en la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo (USLE).

$$SE = K * LS * C \quad [9]$$

Donde, SE: susceptibilidad a la erosión superficial; K: erodibilidad del suelo; L: Longitud de ladera; S: Pendiente y C: Cobertura del suelo. Los incendios forestales son considerados como un agente importante en la erosión del suelo, así como en la degradación de la tierra en ecosistemas boscosos, arbustivos, zonas de agricultura, etc. (DeBano et al., 2005; Shakesby, 2011), como lo ocurrido en la parte sur y sureste de la cuenca San Gabriel en el año 2019, por lo que se considera dentro de este análisis.

Utilizando un Sistema de Información Geográfica (ArcGIS 10.8), se elaboraron mapas tipo ráster para cada factor. Como indica la ecuación [9], los ráster LS , C y K fueron multiplicados utilizando la herramienta “Calculadora Ráster” de ArcGIS 10.8, para obtener un mapa que indique la tasa de erosión en la cuenca. El Factor C se calculó también con base en las condiciones de uso de suelo post incendio para una comparación.

4.5.1 Factor LS

La topografía del terreno afecta al proceso de erosión y se representa por el factor LS . La relación entre erosión y este factor es directamente proporcional, la erosión aumenta conforme la longitud de la pendiente aumenta (L) y la inclinación del terreno se hace mayor (S); es decir que la pérdida de suelo se incrementa conforme aumenta la inclinación de la pendiente (López, 2003).

A partir del Modelo Digital del Terreno se generó un ráster con la pendiente de las laderas en grados; posteriormente se transformó en radianes para el cálculo del factor LS , multiplicando el ráster por $\pi/180$. Para obtener L , se emplea el mapa de acumulación de flujo, el cual nos permite conocer cuáles son las celdas en las que se acumula el agua al fluir desde las celdas con mayor valor de altitud. Finalmente se calcula el factor LS mediante la ecuación [10] de Moore & Burch, 1986. Donde: Flow accumulation es el número de celdas que contribuyen al flujo en una celda dada; cell size es la longitud del tamaño de un lado de la celda y sin slope es el seno de la pendiente en radianes.

$$LS = ((flow\ accumulation * cell\ size)/22.13)^{0.4} * (sin\ (slope)/0.089)^{1.3} \quad [10]$$

4.5.2 Factor C

El factor C o Índice de cobertura de los suelos representa la efectividad de las plantas como cubierta protectora del suelo frente a la energía de impacto de las gotas de lluvia y a la fuerza del flujo superficial. El factor C toma un valor máximo de 1 cuando el suelo presenta un riesgo de erosión mayor, es decir, está menos protegido y cero cuando el suelo está totalmente cubierto. La tabla 3 propone

valores para la asignación de este factor a cada tipo de cobertura de suelo y vegetación. En caso de suelos afectados por incendio el valor de *C* corresponde a 0.95, valor propuesto por Ortiz-Rodríguez (2018). Con base en esta tabla se definieron los valores de *C* por cada tipo de uso de suelo resultado del análisis realizado para el área de estudio.

Tabla 3: Diferentes valores para el factor *C*, de acuerdo a la cobertura del suelo. Obtenido de Borselli et al., 2008.

Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Factor C
1. Superficies artificiales	1.1 Zona urbana		n.c
	1.2 Industrias		n.c
	1.3 Minas, vertederos	1.3.1 Extracción de minerales	1.000
		1.3.2 Sitios de construcción	1.000
1.4 Vegetación artificial no agrícola	1.4.1 Áreas urbanas verdes	0.050	
	1.4.2 Instalaciones deportivas	0.050	
2. Áreas de agricultura	2.1 Área cultivable	2.1.1 Tierras cultivables no regadas	0.100
		2.1.2 Cultivos de vegetales	0.100
		2.1.3 Cultivos en viveros	0.001
	2.2 Cultivos permanentes	2.2.1 Viñedos	0.451
		2.2.2 Plantaciones frutales	0.296
	2.3 Pastos	2.3.1 Pastos	0.150
		2.3.2 Pastos con arbustos	0.130
	2.4 Áreas agrícolas heterogéneas	2.4.1 Agroforestal	0.050
3. Áreas forestales	3.1 Bosques	3.1.1 Bosques mixtos	0.001
		3.1.2 Bosques discontinuos	0.006
		3.1.3 Vegetación	0.006
	3.2 Espacios abiertos con poca o nula vegetación	3.2.1 Rocas desnudas	0.900
4. Humedales	4.1 Humedales costeros	4.1.1 Planicies	1.000
5. Cuerpos de agua	5.1 Agua continental	5.1.1 Cuerpos de agua	n.c
		5.1.2 Corrientes	n.c

4.5.3 Factor *K*

La erodibilidad o factor *K*, es una medida de la susceptibilidad del suelo al desprendimiento y transporte de sus partículas, la cual está influenciada por numerosas propiedades, tales como textura, estabilidad estructural, contenido de materia orgánica, mineralogía de arcillas y constituyentes químicos, entre otros (Borselli, 2012). Este factor refleja el hecho que diferentes suelos se erosionan a diferentes tasas. La tabla 4, propone una clasificación de acuerdo al valor de la erodibilidad.

Tabla 4: Clasificación de la erodibilidad, propuesta por Rivera y Gómez, 2009.

Código	Erodibilidad Mg·h·m ² /MJ·mm·m ²	Clasificación
1	Menor de 0.01	Natural
2	0.01- 0.02	Bajo
3	0.02-0.03	Moderado/medio
4	0.03-0.05	Medio alto
5	0.05-0.07	Alto
6	0.07-0.10	Muy alto
7	0.10-0.15	Severo
8	Mayor a 0.15	Extremadamente severo

La intensificación de la erosión de los suelos está generalmente asociada a su uso (Leh et al., 2013 y Ferreira et al., 2015) y comúnmente las áreas cultivadas presentan las tasas de erodibilidad más altas (Roseberg y McCoy, 1992, Yasar et al., 2018). La pérdida de materia orgánica también tiene un impacto negativo en las propiedades físicas y químicas del suelo, ya que en menor cantidad o su ausencia resulta en un decremento de la estabilidad y en la estructura de los suelos (Dominy y Haynes, 2002).

Para conocer el factor de erodibilidad se utilizó el programa libre Kuery 1.5 desarrollado por Borselli (2012). El programa se basa en un algoritmo asociado con la combinación del tipo de clima en la zona de estudio y parámetros de entrada del suelo. El algoritmo considera lo siguientes parámetros texturales del suelo:

- a) El logaritmo de la media en la distribución granulométrica (D_g), utilizado por Torri et al. (1997, 2002), que puede ser calculado directamente mediante la ecuación [11].

$$D_g = \sum_i f_i \log_{10}(\sqrt{d_i - d_{i-1}}) \quad [11]$$

Donde f_i es la fracción de tamaño de las partículas en un rango de diámetros d_i y d_{i-1} (en mm). Considerando tres componentes texturales del suelo: arena (S), limo (L) y arcilla (C). D_g también se puede calcular mediante la ecuación [12], fórmula más simplificada (Borselli et al., 2009):

$$D_g = \frac{-3.5C - 2.0L - 0.5S}{100} \quad [12]$$

- b) El segundo parámetro textural (S_g) es la desviación estándar de D_g , el cual es calculado mediante la ecuación [13] propuesto por Borselli, 2009. Considerando igualmente los tres componentes texturales, arena, limo y arcilla.

$$S_g = \sqrt{\frac{[C(-3.5 - D_g)^2 + L(-2.0 - D_g)^2 + S(-0.5 - D_g)^2]}{100}} \quad [13]$$

- c) El porcentaje de materia orgánica (SOM).
- d) El porcentaje del contenido de fragmentos de roca (Rk).

El clima que se seleccionó como parámetro inicial en el programa Kuery fue un clima cálido que representa a la cuenca de San Gabriel y con fragmentos de roca menores al 10%. Para los demás parámetros de entrada: cantidad de arena, limo y arcilla, así como el porcentaje de materia orgánica se utilizaron los datos que se obtuvieron en el trabajo de laboratorio. Los valores de K obtenidos para cada horizonte de las muestras analizadas se promediaron por cada clase de uso de suelo para la obtención del mapa de la distribución del factor K .

4.6 Análisis de precipitación

Se realizó un inventario histórico de la precipitación registrada a partir de datos descargados del sitio web del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Para este análisis se utilizó la información de precipitación para dos estaciones: la estación de San Gabriel ubicada al oeste de la cuenca y la de Ciudad Guzmán, ubicadas en las cercanías de la cuenca (Figura 13).

A partir de un análisis de la precipitación registrada en la zona de estudio, se determinó la lluvia acumulada en 1) un año; 2) por mes; 3) 3-5 días y 4) 1 día, con el fin de conocer el promedio de estas precipitaciones y los años en los cuales ocurrieron eventos de lluvia extrema.

Posteriormente se obtuvo la probabilidad de excedencia (P_x). Para esto, los datos de lluvia acumulada por año, por mes (mm) se ordenan de mayor a menor y se le asigna una posición numérica. La posición de los datos determina la probabilidad de un cierto nivel de precipitación a ser superado, este valor se representa como un porcentaje acumulado, es decir de 0-100%. La probabilidad de excedencia se calcula a partir de la distribución de Weibull (1939), utilizando la ecuación [14]. Donde r representa la posición numérica del dato, y n es el número total de datos que se tiene:

$$P_x = \frac{r}{(n + 1)} * 100 \quad [14]$$

A partir de la distribución de los datos se puede obtener la curva de tendencia, cuya ecuación podría permitir extrapolar la probabilidad de excedencia para un valor dado. El periodo de retorno (P_r), indica

un cierto número de años en el cual se espera que ocurra una determinada cantidad de precipitación, se obtiene con el inverso de la probabilidad de excedencia P_x .

$$P_r = \frac{1}{P_x} \quad [15]$$

También se calculó la probabilidad de ocurrencia (P_N) de una cantidad de lluvia determinada, en un cierto lapso de tiempo, como se muestra en la ecuación [16], relacionada con la probabilidad de excedencia (P_x), con N siendo el número de años para el cual se quiere calcular dicha probabilidad.

$$P_N = 1 - (1 - P_x)^N \quad [16]$$

Estudios previos han demostrado que la variabilidad de los datos de lluvia se ajustan mejor a la distribución de Gumbel. Los datos de lluvia se ordenan de la misma forma, sin embargo para su distribución se aplica la ecuación [17].

$$-lm(-lm(f(x))) * \alpha + \mu \quad [17]$$

Donde: $\alpha = S_x/S_n$; S_x es la desviación estándar de los datos y S_n se obtiene a partir de tablas, de acuerdo al número total de datos que se tenga; $\mu = x - (y_n * \alpha)$, donde: x es el valor de la media de la distribución de los datos y y_n se obtiene a través de tablas con base en el número total de datos aquí considerados. Con la ecuación [17] se recalcula el valor de la función $f(x)$ por cada dato de lluvia y se obtiene la distribución de Gumbel para la serie de datos.

Para conocer la cantidad de lluvia esperada en mm para diferentes periodos de retorno (T) se estima por medio de las siguientes ecuaciones [18,19] a partir del método de Gumbel (Gómez-Balmaceda et al. 2020).

$$Y_T = -ln[ln\left(\frac{T}{T-1}\right)] \quad [18]$$

$$X_T = \mu + \alpha(Y_T) \quad [19]$$

Donde: α y μ , corresponden a los parámetros estadísticos de la distribución de los datos antes descritos, T es el periodo de retorno en años.

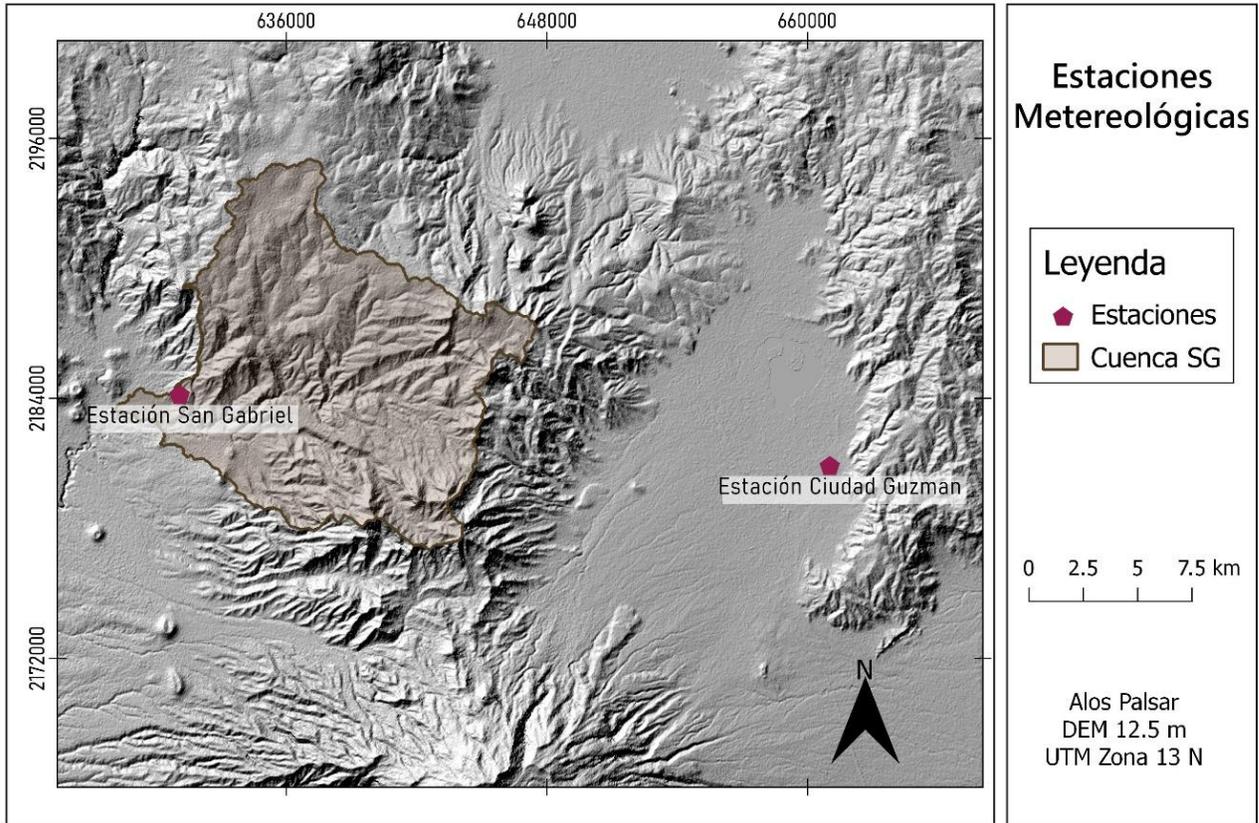


Figura 13: Localización geográfica de las dos estaciones meteorológicas (CONAGUA): estación San Gabriel y estación Ciudad Guzmán.

Para cada estación se obtuvo: un histograma de lluvias para el periodo analizado, la probabilidad de excedencia, periodos de retorno, probabilidad de ocurrencia y la distribución de Gumbel. El análisis se realizó a nivel anual y mensual. Además, como antes descrito, se evaluaron los máximos diarios y el valor máximo de lluvia acumulada de 3-5 días. En particular, el análisis diario y de los 3-5 días se requiere para la identificación de eventos extremos con diferentes periodos de retorno que serán utilizados para las simulaciones de lluvia-escurrimiento.

Los valores diarios serán representativos de eventos discretos, normalmente asociados al principio de la temporada de lluvia, de corta duración y de alta intensidad, mientras que los eventos con una duración entre 3 y 5 días son representativos de lluvias persistentes asociados a la llegada de huracanes en la región.

4.7 Simulaciones para la caracterización hidrológica de las cuencas y definición de las zonas de posible inundación

El código FLO 2D (O'Brien, 1993) es una herramienta ampliamente utilizada para la evaluación de zonas susceptibles a inundaciones durante eventos de lluvia o ruptura de represamientos, incluyendo el transporte de sedimentos. En el presente trabajo es utilizada para definir las características hidrológicas de cada subcuenca, sus curvas de descarga con base en diferentes escenarios de lluvia y los límites de inundación de los flujos de agua y sedimentos que se lleguen a formar en el río Salsipuedes.

En particular, los umbrales definidos por diferentes periodos de retorno a partir de los datos históricos de la estación San Gabriel son aquí utilizados para definir las curvas y el volumen total de descarga de cada subcuenca; estos datos son empleados para construir las curvas hidrográficas de los flujos de agua y sedimentos que se canalizan en el río Salsipuedes para la definición de las zonas de posible inundación.

4.7.1 Modelo matemático FLO 2D

El código matemático Flo 2d es un modelo cuadrático de esfuerzo cortante, con una malla establecida sobre el área topográfica para el cálculo de la profundidad y velocidad del flujo entre los elementos de la malla. La velocidad en 8 direcciones es calculada con un algoritmo que incluye la geometría del flujo, rugosidad (Manning n), la pendiente entre dos elementos en la malla y el área inundada. Para la simulación de lluvias, el modelo incluye diferentes modalidades, desde lluvias variables en el espacio y tiempo a lluvias estacionarias. En cuanto a la infiltración se puede utilizar el modelo de Green-Ampt o el Número de Curva.

Los flujos de agua y sedimentos son simulados con base en un modelo reológico cuadrático que involucra concentración de sedimentos, resistencia al corte, viscosidad. FLO 2D reproduce el movimiento de fluidos viscosos como una función de la concentración de sedimentos. Durante la simulación, el código supone que el flujo es continuo durante el tiempo que se le asigna y que un elemento del canal está representado por su geometría y su rugosidad uniforme.

Los datos de entrada requeridos para la simulación consisten en: inflow (punto de inicio de un flujo) y outflow (puntos de salida del flujo desde el dominio computacional), valores de n Manning, coeficientes reológicos de la viscosidad y resistencia al corte (α y β), resistencia al flujo laminar (k). Los

parámetros reológicos son parámetros empíricos que relacionan la resistencia al corte y la viscosidad a la concentración de sedimentos (O'Brien y Julien, 1988).

$$\eta = \alpha_1 e^{(\beta_1 C_v)} \quad [20]$$

$$\tau_y = \alpha_2 e^{(\beta_2 C_v)} \quad [21]$$

Donde α y β son coeficientes empíricos definidos experimentalmente por O'Brien y Julien (1988), la viscosidad y el esfuerzo están en función de la concentración volumétrica de sedimentos C_v , limo, arcilla y arena fina. Por lo anterior el programa es idóneo para simular flujos de agua y sedimento con concentraciones de 0.2-0.5.

Además de los parámetros reológicos es necesario contar con los siguientes parámetros para realizar las simulaciones.

- Curva hidrográfica de descarga: es la representación gráfica que expresa la variación en el tiempo de un flujo. Para realizar la curva, se puede utilizar valores a partir de métodos directos, como los datos de la amplitud sísmica de un evento registrado (Caballero y Capra, 2014), métodos indirectos a través de ecuaciones empíricas (Rickenmann 1999), o curvas teóricas construidas a partir de la estimación del volumen total del flujo (Caballero y Capra, 2014).
- Coeficiente de Manning (n): Es un factor importante ya que define la movilidad de un flujo y se relaciona con diversos factores como son las irregularidades en la base del canal, las obstrucciones, la vegetación, el tamaño y forma del canal. O'Brien y Julien (1988).
- Número de Froude: Representa la relación entre la fuerza de inercia y gravedad, define el régimen del flujo, supercrítico, crítico o subcrítico, cuando el valor es mayor a 1 se trata de un flujo supercrítico y si es menor a 1 se considera como subcrítico, siendo una cantidad adimensional.

4.7.2 Simulación de lluvia-escurrimiento

La metodología empleada consistió en definir diferentes escenarios principales de lluvia a partir del análisis de las precipitaciones históricas de la estación meteorológica de San Gabriel.

Las simulaciones fueron realizadas con un DEM de 12.5 m de resolución y con una malla computacional de 30 m de resolución. Por el tamaño de la cuenca no fue posible utilizar una malla más fina. Para definir las curvas de descarga y el volumen total de agua que cada subcuenca aporta durante los diferentes eventos de lluvia se trazaron perfiles en la zona de salida de cada una de ellas.

Las simulaciones se realizaron con y sin infiltración. Para incluir el proceso de infiltración se utilizó el valor de Número de Curva (NC), parámetro hidrológico semiempírico que a partir del tipo de suelo y de su uso, permite definir el potencial de infiltración, el valor varía de 0 a 100, es decir a mayor valor menor es la capacidad de infiltración. El tipo de suelo es dividido en cuatro categorías:

- Grupo A: son suelos predominantemente arenosos, donde el agua se infiltra libremente y por ende tienen un bajo potencial de escorrentía cuando están completamente húmedos.
- Grupo B: son suelos con texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas que tienen potencial de escorrentía moderadamente bajo.
- Grupo C: suelos que limitan el movimiento vertical de agua, con texturas de moderadamente finas a finas. El potencial de escurrimiento es moderadamente alto.
- Grupo D: son suelos con alto potencial de escorrentía y tasas de infiltración muy bajas, texturalmente son arcillosos, el nivel freático es alto o son suelos poco profundos, asentados sobre un material impermeable.

Una vez definido el grupo de suelo, se determina el NC dependiendo del tipo de cobertura, que puede variar desde suelo desnudo, vegetación natural, cultivos a zonas urbanas. Para la simulación de lluvia-escorrimento se puede usar un valor de NC global para toda la cuenca o utilizar polígonos por cada tipo y uso de suelo.

Capítulo 5: Resultados

5.1 Análisis morfológico

5.1.1 Hipsometría

El mapa hipsométrico permite identificar rasgos altitudinales de la cuenca San Gabriel. Las elevaciones más altas se presentan en la porción Sur con valores de 2651 msnm, seguido de los flancos norte y noreste con elevaciones que se encuentran en un rango de 2380-2200 msnm. Conforme nos acercamos al municipio de San Gabriel en lado oeste de la cuenca, estas elevaciones disminuyen con valores menores a 1500 msnm (Figura 14).

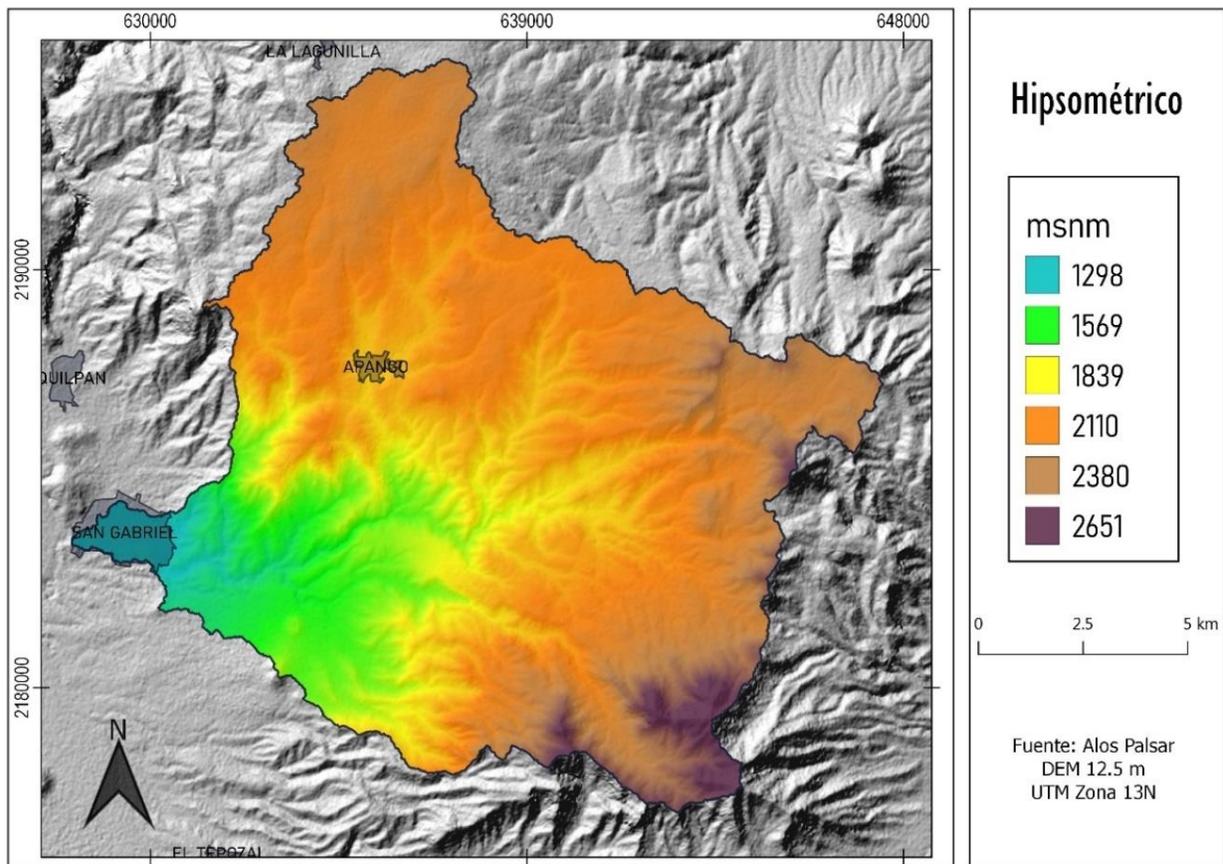


Figura 14: Mapa hipsométrico en m.s.n.m de la cuenca San Gabriel.

5.1.2 Geometría de las subcuencas

La geometría y pendiente de una cuenca controla el comportamiento hidrológico de la misma y son parámetros clave en los procesos de iniciación de flujos de escombros (Pareschi et al., 2000).

Se clasificaron un total de 12 subcuencas (figura 15). Las subcuencas con mayor área se encuentran en la porción N-NE, mientras que las de menor tamaño se encuentran al sur de la cuenca San Gabriel. En particular, la subcuenca denominada con el número 5 presenta mayor área con un valor de 26.79 km², seguido de la subcuenca 2 y 9 con 25.77 km² y 24.94 km² respectivamente (Tabla 5). Con respecto a los perímetros, el mayor valor es el que presenta la subcuenca 2 con 48.27 km, y el de menor perímetro se ubica en la subcuenca 6 con 9.85 km.

Estas diferencias en el área y en la forma se pueden correlacionar con una respuesta de descarga de agua diferente durante un evento de lluvia. En drenajes circulares todos los puntos son equidistantes al canal principal por lo que toda la precipitación llegará a la corriente al mismo tiempo, con la concentración de un gran volumen de agua. En cambio, en una cuenca más alargada, los drenajes laterales drenan rápidamente en el canal principal en diferentes puntos dando como resultado a una descarga total más baja (Capra et al. 2018).

Para conocer la forma de las subcuencas se aplicó la ecuación [1] para la definición del Índice de Gravelius; los resultados se presentan en la tabla 5. Cuanto menor sea el valor, o este se acerque a el valor de 1, más circular es la forma de la cuenca. Las subcuencas que se acercan a esta forma son las 4 y 9 con valores de 1.57 y 1.49 respectivamente, sin embargo, la mayoría de las subcuencas en la zona de estudio son elongadas, con valores mayores a 2 en las subcuencas 0, 2, 3, 8 y 10.

Tabla 5: Geometría de las doce subcuencas e Índice de Gravelius (K_G).

Subcuencas	Área (km ²)	Perímetro (km)	K_G
0	3.12	18.35	2.93
1	9.35	27.12	2.50
2	25.77	48.27	2.68
3	10.41	34.02	2.97
4	5.31	12.85	1.57
5	26.79	39.75	2.17
6	1.78	9.85	2.08
7	22.17	31.67	1.90
8	14.50	35.47	2.63
9	24.94	30.50	1.72
10	19.01	36.52	2.36
11	14.11	24.80	1.86

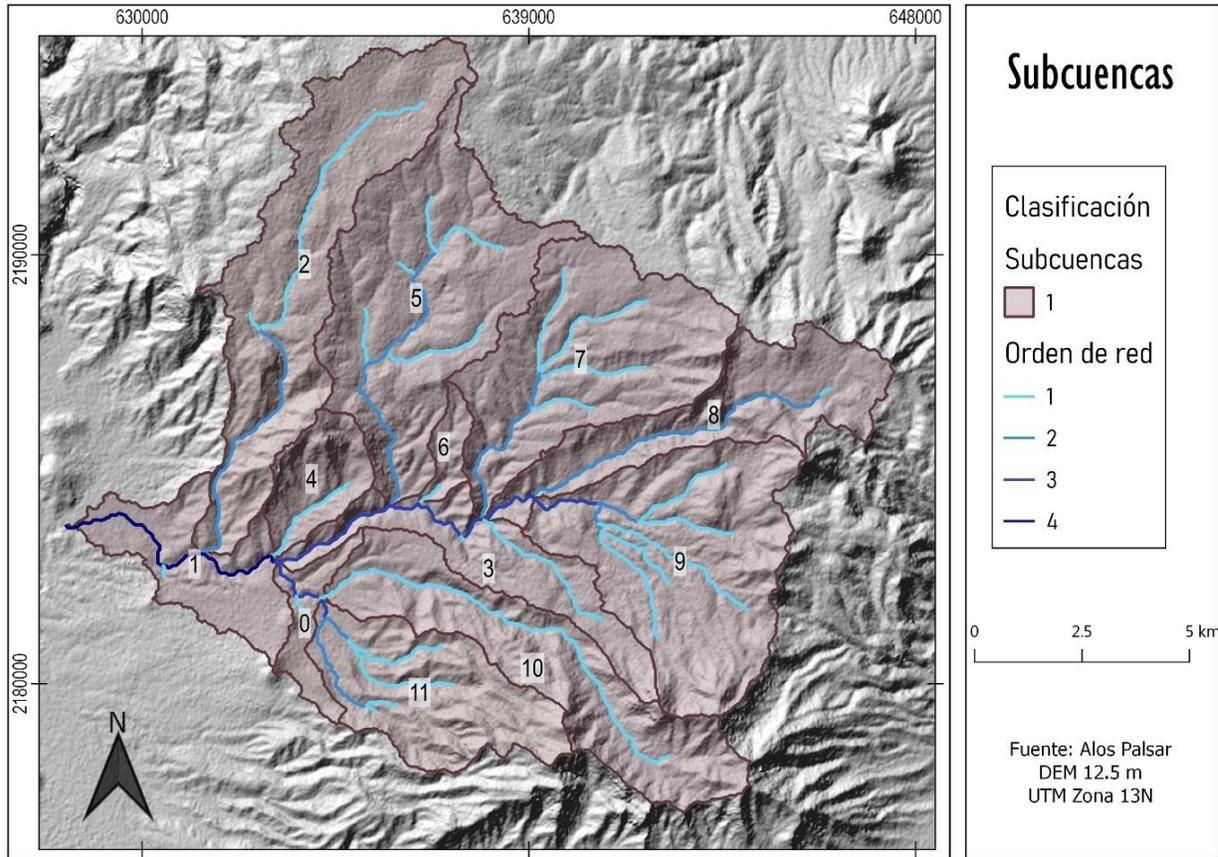


Figura 15: Mapa que muestra la división de las 12 subcuencas dentro de la cuenca de San Gabriel.

5.1.3 Pendiente

La cuenca presenta un amplio rango de valores de pendiente. En la parte alta se encuentran pendientes mayores a los 50° , lo que indicaría una intensa dinámica fluvial y gravitacional, lo mismo ocurre en la parte sur con inclinaciones $>55^\circ$. En la porción norte estas pendientes disminuyen considerablemente a los 15° . La porción central de la cuenca presenta una morfología muy disectada con pendientes en un rango de $25^\circ - 60^\circ$.

Hacia la porción baja de la cuenca (SE) las pendientes tienen valores menores a 10° (Figura 16).

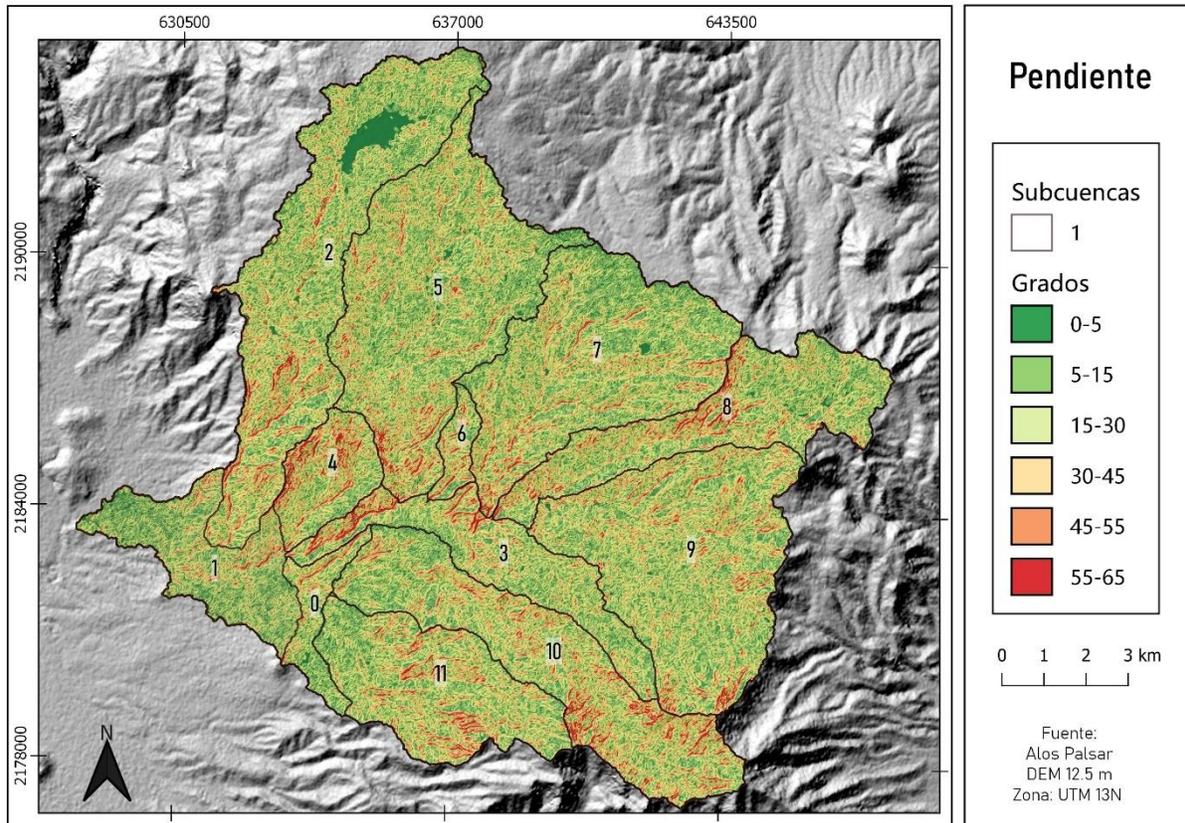


Figura 16: Mapa de pendientes, expresado en grados con la delimitación de las subcuencas.

5.1.4 Curvatura

La curvatura de las laderas es uno de los factores que intervienen en la formación de flujos de escombros. La curvatura de las laderas puede intervenir en la formación de deslizamientos, ya que según sean cóncavas o convexas pueden representar una zona de acumulación de agua y sedimentos o a ser erosionada más fácilmente.

Para la clasificación de este parámetro se distinguieron las porciones cóncavas o convexas, como se observa en la figura 17.

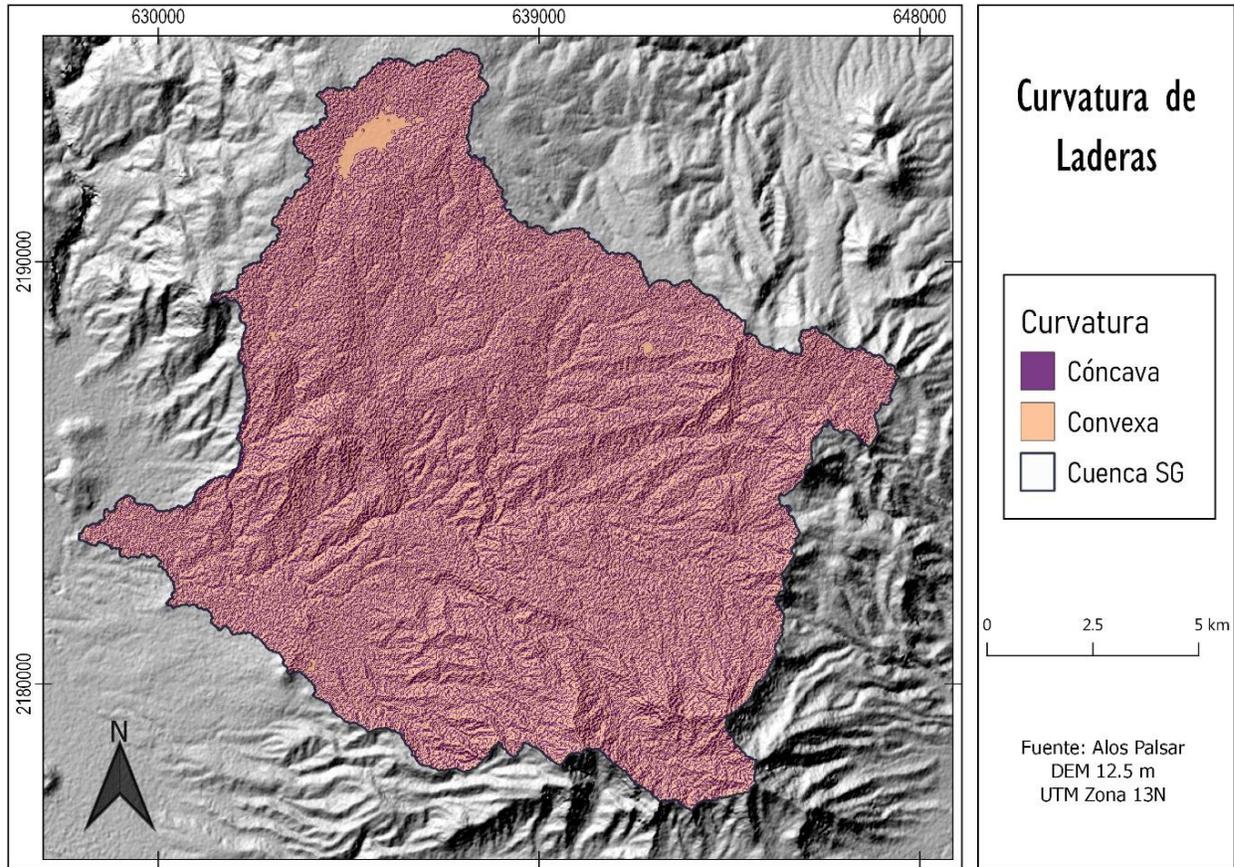


Figura 17: Mapa de coberturas de laderas en la cuenca.

5.1.5 Orientación

En las laderas de una cuenca, procesos como el intemperismo y la humedad se presentan generalmente en una orientación preferencial. Estas orientaciones se expresan en la figura 18. La clasificación se limitó a 4 categorías, que representan valores azimutales: $0^\circ - 90^\circ$, de $90^\circ - 180^\circ$, $180^\circ - 270^\circ$ y $270^\circ - 360^\circ$. Para las subcuencas 10, 11 la orientación predominante es norte-noreste, mientras que en las subcuencas 2, 4 y 5 la orientación que más predomina es hacia noroeste- oeste.

Para la subcuenca 1, esta orientación se presenta mayormente hacia el suroeste- sur, lo mismo ocurre para la subcuenca 3.

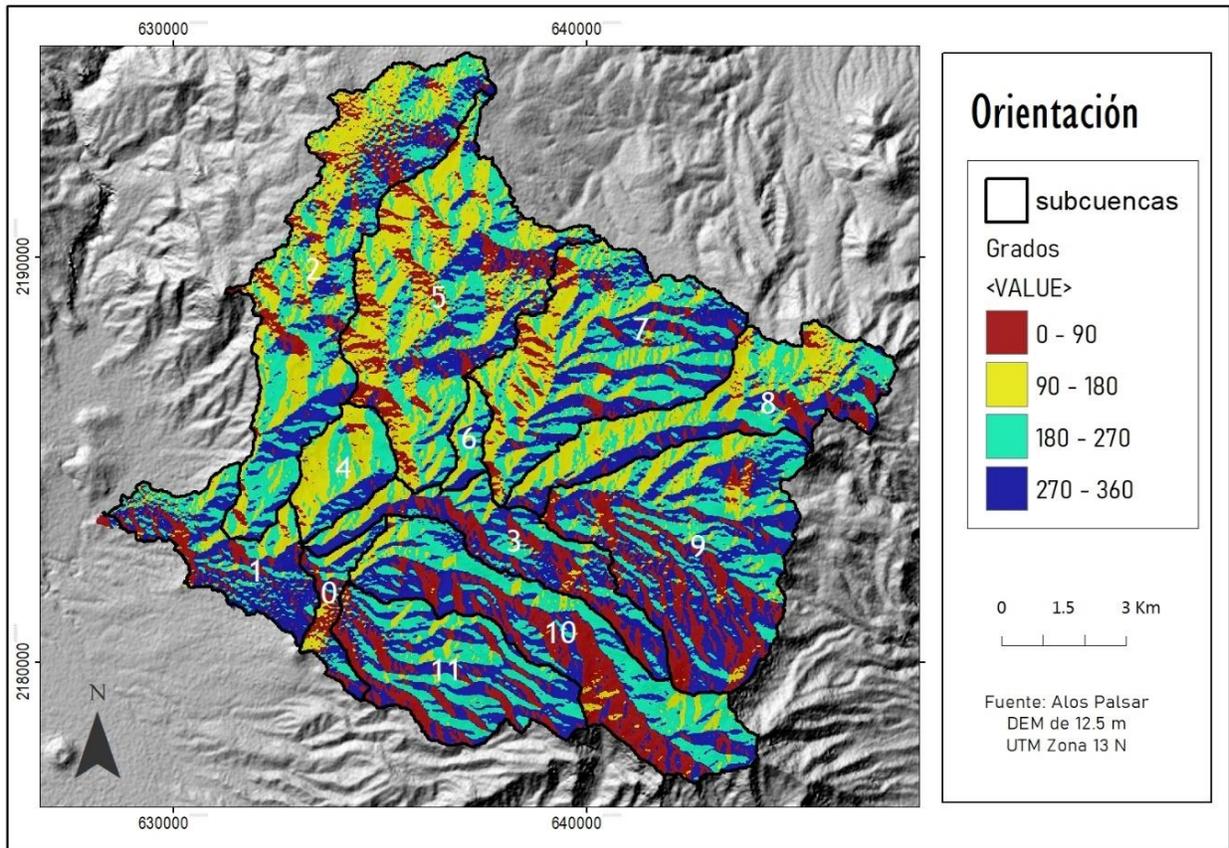


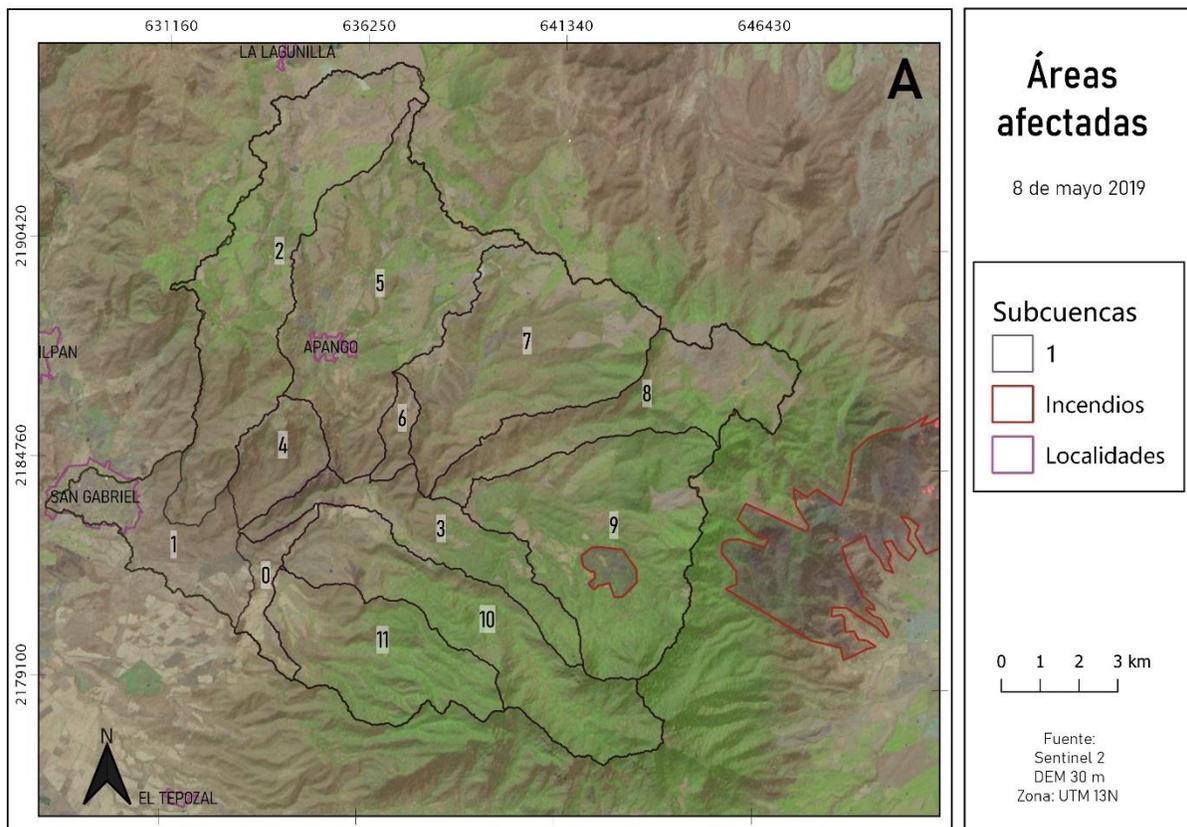
Figura 18: Mapa de orientaciones expresadas en grados.

5.2 Áreas afectadas por los incendios

Los incendios forestales pueden ser considerados como una perturbación en el sistema hidrológico, en la composición y coberturas del suelo de una cuenca (Ebel y Mirus, 2014). El suelo después de un incendio es susceptible a sufrir erosión debido a lo expuesto que queda a la acción del viento y del agua. Otras problemáticas relacionadas a los incendios es la pérdida de bosques y vegetación por la combustión, reducción o pérdida de la capa orgánica, eliminación o degradación parcial o total de las raíces de las plantas (Estrada, 2019). Estos cambios provocan una disminución en el proceso de infiltración y un incremento del flujo superficial del agua (Caon, 2014 y Shakesby, 2011). Además, la recurrencia de múltiples incendios forestales en el mismo sitio, ralentiza la pronta recuperación de la vegetación, aumenta la escorrentía, la erosión y la eliminación de nutrientes del suelo (Hosseini et al., 2016; McGuire y Youberg, 2019).

Los incendios que ocurrieron en la cuenca San Gabriel se registraron en el mes de mayo. El área afectada se delimitó utilizando imágenes satelitales Sentinel 2 adquiridas después del evento. De

acuerdo con estas imágenes, el incendio inició los primeros días del mes de mayo de 2019, para el 8 de mayo el incendio afectó un área de 1.30 km² (5.2 %) en la subcuenca 9 y una superficie de 22.4 km² hacia el este, fuera de la cuenca de San Gabriel (Figura 19A). los incendios continuaron propagándose durante los días siguientes quemando a su paso bosques, vegetación secundaria, zonas de cultivos varios y de aguacate; para el 13 de mayo la zona afectada ya abarcaba un área de 49 km² (Figura 19B), afectando principalmente la subcuenca 8, 10 y 11 y la porción sur de las subcuencas 3 y 9. Finalmente, para la fecha del 6 de junio del mismo año el área perjudicada fue de 63.30 km², es decir el 35.5% de la superficie total de la cuenca San Gabriel, siendo la subcuenca 8 la más perjudicada con hasta 90% de afectación en su superficie.



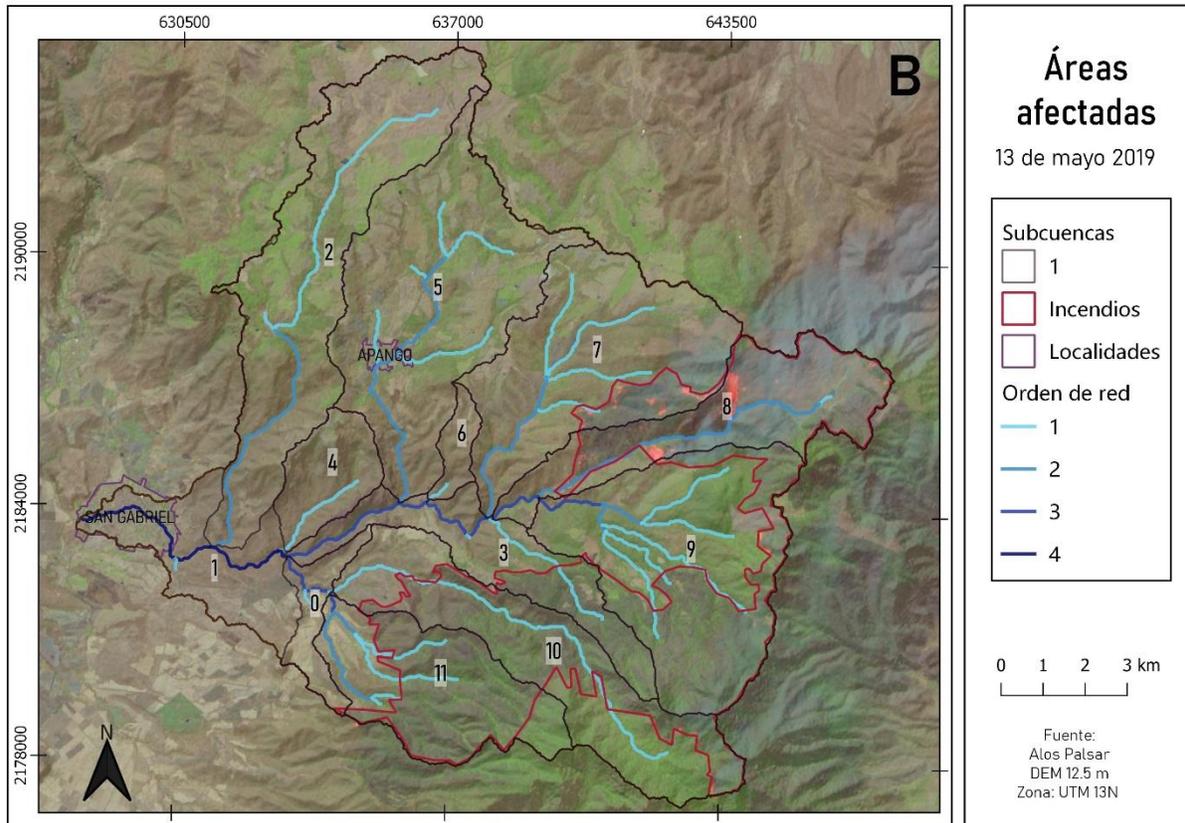


Figura 19: Área que fue afectada por los incendios, delimitados en color rojo, a partir de imágenes satelitales, con fechas de A) 8 de mayo de 2019 y B) 13 de mayo de 2019.

5.3 Análisis espacio-temporal de uso de suelo y vegetación

El mapa de la figura 20, se refiere al uso de suelo definido para el año 2022. Se observa como el uso de suelo con vegetación natural predomina en la cuenca de San Gabriel con una extensión de 88.73 km². Esta vegetación corresponde a bosques de encino-pino y a una vegetación secundaria arbustiva de matorral subtropical. El área correspondiente a zonas de cultivo exclusivo de aguacate es de 48.02 km², y se ubica principalmente en la parte norte y noreste de la cuenca. Las zonas destinadas a cultivos varios comprenden una extensión de 28.12 km², y corresponden a agricultura de temporada.

En menor proporción se presentan los suelos denominados desnudos con una extensión de 8.82 km², principalmente en la porción oeste; finalmente la zona urbana se extiende sobre 4.08 km², y corresponde a la cabecera municipal de San Gabriel al oeste de la cuenca y al poblado de, Apango al norte de la misma.

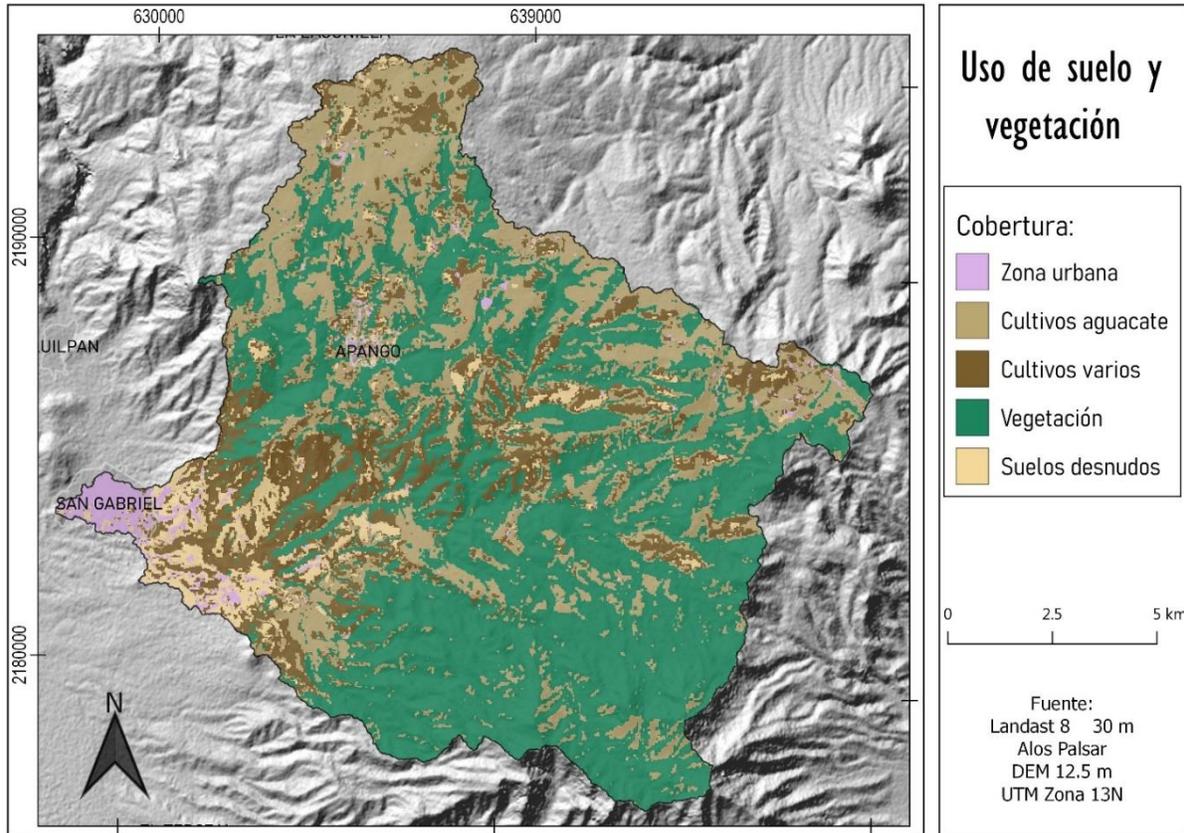


Figura 20: Uso de suelo actual en la cuenca de San Gabriel con 5 coberturas: 1) zonas urbanas, 2) cultivos de aguacate, 3) zona de cultivos varios, 4) vegetación natural y 5) suelos desnudos.

5.3.1 Cambios en el uso de suelo y vegetación en la cuenca

Los resultados obtenidos comparando los mapas de uso de suelo definidos para los años 2014, 2019 y 2022 se muestran en la tabla 6. Se observa que en la categoría de cultivos de aguacate el área aumentó considerablemente para el año 2019 en comparación con el año 2014, alcanzando un valor de 24%, y aumentando a 27% para el año 2022 (Figura 21). Este cambio se observa principalmente en la parte norte y centro de la cuenca. El mismo comportamiento se presenta para los suelos desnudos, con un incremento de 1.65% para el año 2014 a 4.95% en el año 2022.

Con respecto a la vegetación natural se observa un decremento, del 66% para el año 2014, a 57% para el 2019 y finalmente en 49.9% en el año 2022, lo que corresponde a un área de 88.73 km², principalmente en la porción sureste y oeste de la cuenca. La zona urbana presenta un aumento muy ligero en su extensión de 1.96% en el 2014 a 2.8% en el año 2019.

Tabla 6: Cambios en las coberturas del suelo en km² y % para los años 2014, 2019 y 2022 en la cuenca.

Cobertura del suelo	Área (km ²)	%	Área(km ²)	%	Área (km ²)	%
	2014	2014	2019	2019	2022	2022
Zona urbana	3.4	1.9	5.0	2.8	4.0	2.3
Cultivos aguacate	35.5	19.9	43.4	24.4	48.0	27.0
Cultivos varios	17.7	10.0	22.8	12.8	28.1	15.8
Vegetación natural	118.0	66.4	103.0	57.9	88.7	49.9
Suelos desnudos	2.9	1.6	3.5	1.9	8.8	4.9

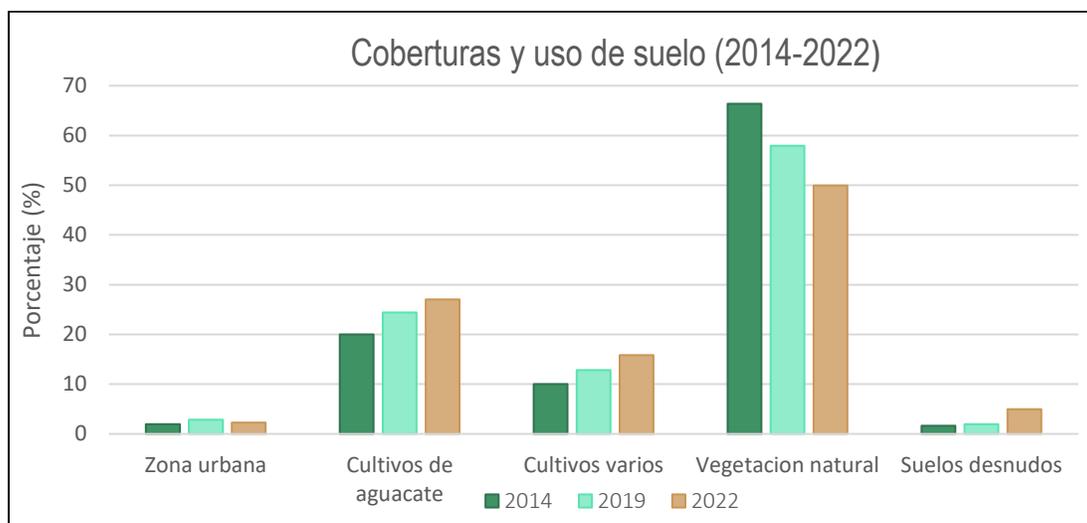


Figura 21: Histograma que muestra los cambios de uso de suelo y vegetación en porcentaje para los años 2014, 2019 y 2022.

5.3.2 Cambios en el uso de suelo y vegetación por subcuencas

Para un estudio más detallado de los cambios que han ocurrido a lo largo de los años (2014-2022), y definir las subcuencas más degradadas, se realizó un análisis por cada una de las doce subcuencas en la zona de estudio. La tabla 7 muestra las áreas en porcentaje por cada uso de suelo.

Para la subcuenca 0, el área correspondiente a cultivos varios muestra un aumento importante desde el año 2014 con 12.71% al 2022 con 45.23%, mientras que en la vegetación natural el comportamiento es inverso, con una disminución de 42.28% a 12.66%, (Tabla 7). En la subcuenca 1 el cambio más notable, corresponde a un drástico incremento en suelo desnudo, que actualmente representa el 37.18%. Las subcuencas 2 y 5 aun cuando no muestran cambios importantes, destacan por consistir en más del 50% en áreas dedicadas al cultivo, similar a la subcuenca 4, en donde las áreas pertenecientes a cultivos varios y suelos desnudos presentan un aumento importante en los ocho años de análisis, de 2% en el año 2014 a 52.7% para cultivos varios y 0.35% a 12.1% para suelos desnudos.

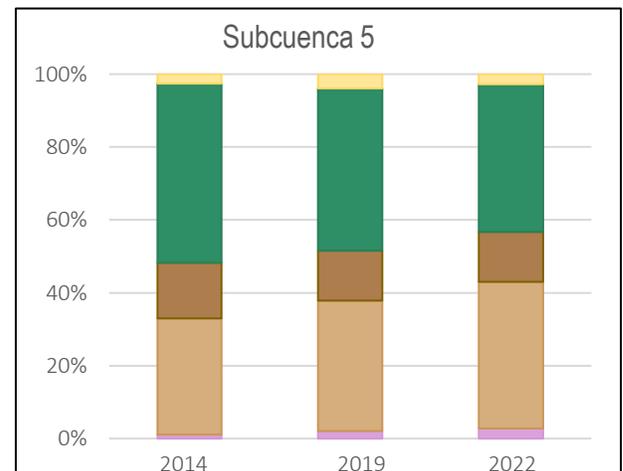
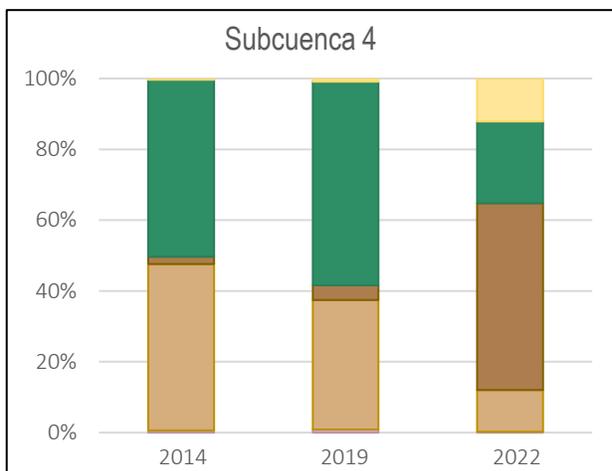
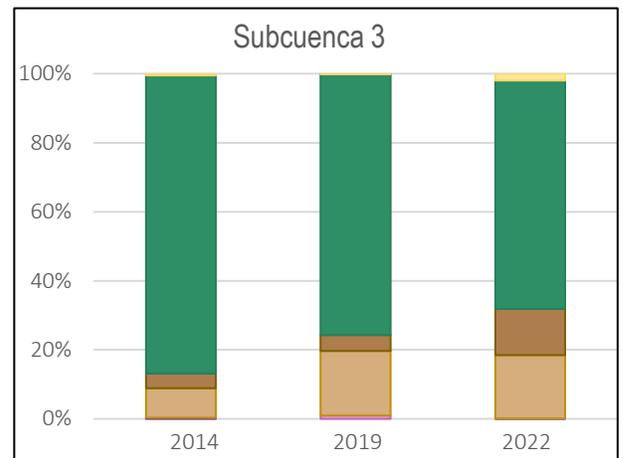
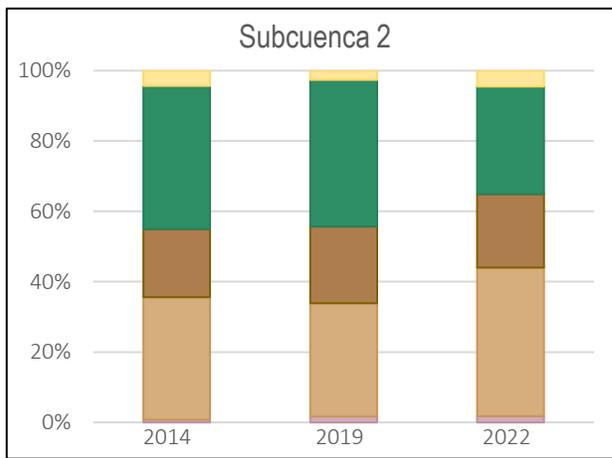
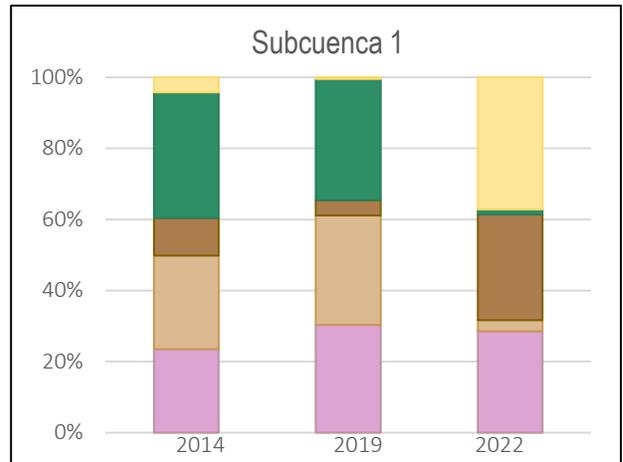
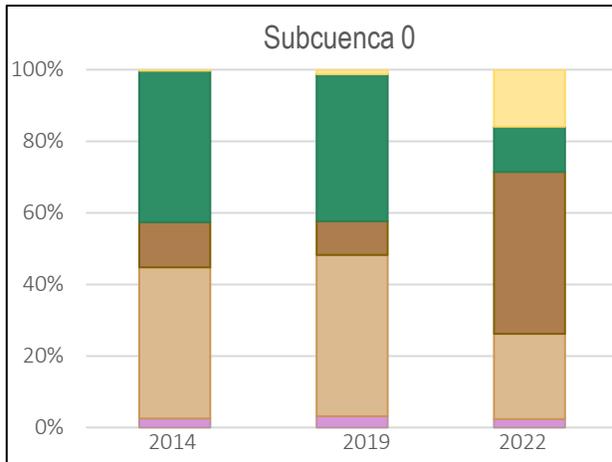
Las subcuencas 6,7 y 8 presentan una tendencia similar, con una disminución en la vegetación natural y un incremento en áreas de cultivos. La zona urbana ubicada en la subcuenca 8 no presenta una variación en los años 2014 y 2019, aunque para el año 2022 tuvo un crecimiento de 1.51%, las zonas destinadas al cultivo de aguacate se extendieron en un área de 35.53% para el año 2022 en comparación del 2014 que era de 13.71%, las áreas de vegetación natural disminuyeron de 68.2% a 45.32%. En general, se observa un aumento en el desarrollo de los suelos desnudos para el año 2019 y 2022, esto se puede observar principalmente en la parte noreste de la cuenca (Figura 23). Por otro lado, las subcuencas 9,10 y 11 que representan la porción sur de la cuenca de estudio son las que conservan el mayor porcentaje de vegetación natural, sin embargo, fueron las de mayor afectación por los incendios (Figura 24). Con base en el análisis espacio-temporal de cambio de uso de suelo se pueden identificar las subcuencas con mayor degradación por un cambio drástico de uso de suelo, desde vegetación a cultivos, como por ejemplo las subcuencas 0,1 y 4. Aquellas que a lo largo de los últimos 8 años han sido extensamente utilizadas para zonas de cultivo como las subcuencas 2 y 5, y aquellas que han experimentado un cambio gradual como son 6, 7 y 8 en donde actualmente más del 50% de la superficie es dedicada al cultivo. En particular, la subcuenca 8 fue mayormente afectada por los incendios del 2019 y después del evento, los terrenos afectados han sido transformados, en su mayoría en cultivos de aguacate (Figura 22).



Figura 22: Foto perteneciente a la muestra SG2105, zona que fue afectada por los incendios, pero actualmente es destinada a un área de cultivo de aguacate.

Tabla 7: Cambios en el uso de suelo y vegetación expresado en porcentaje, (años 2014, 2019 y 2022) y % afectado por los incendios por subcuenca ocurridos en 2019.

Cambios en las Coberturas del suelo (%)							
Subcuenca	Años	Zona urbana	Cultivos aguacate	Cultivos varios	Vegetación natural	Suelos desnudos	Incendio
0	2014	2.5	42.1	12.7	42.2	0.2	-
	2019	3.1	45.1	9.3	41.1	1.2	-
	2022	2.3	23.8	45.2	12.6	15.9	-
1	2014	23.5	26.2	10.6	35.3	4.2	-
	2019	30.3	30.8	4.2	34.1	0.4	-
	2022	28.5	3.1	29.7	1.4	37.1	-
2	2014	0.7	34.8	19.4	40.6	4.3	-
	2019	1.7	32.1	21.8	41.6	2.6	-
	2022	1.8	42.2	20.8	30.5	4.5	-
3	2014	0.2	8.63	4.2	86.3	0.4	-
	2019	0.9	18.7	4.5	75.5	0.1	37.6
	2022	0.0	18.3	13.3	66.1	2.0	-
4	2014	0.6	46.9	2.0	49.9	0.3	-
	2019	0.9	36.6	4.1	57.4	0.9	-
	2022	0.2	11.7	52.7	23.0	12.1	-
5	2014	1.1	31.8	15.3	49.1	2.5	-
	2019	2.0	35.7	13.7	44.5	3.8	-
	2022	2.7	40.3	14.6	40.5	2.7	-
6	2014	0.1	32.1	7.1	59.9	0.6	-
	2019	0.5	19.6	13.0	64.5	2.2	-
	2022	0.3	18.9	29.2	49.7	1.6	-
7	2014	0.5	16.2	10.6	70.6	1.8	-
	2019	0.8	22.3	18.2	55.6	3.0	28.2
	2022	0.3	33.4	18.5	43.8	3.9	-
8	2014	0.5	13.7	16.9	68.2	0.5	-
	2019	0.5	27.5	26.4	42.6	2.8	90.8
	2022	1.5	35.5	16.2	45.3	1.4	-
9	2014	0.4	7.3	4.0	87.8	0.4	-
	2019	0.7	8.7	11.8	77.7	0.9	62.4
	2022	0.1	16.2	5.9	76.8	0.8	-
10	2014	0.4	6.7	1.3	91.2	0.1	-
	2019	0.4	16.1	6.2	76.1	1.0	70.4
	2022	0.1	18.9	6.4	71.1	3.2	-
11	2014	0.2	8.2	1.4	89.9	0.1	-
	2019	0.7	16.1	2.5	80.2	0.4	78.1
	2022	0.2	13.8	4.9	80.6	0.4	-



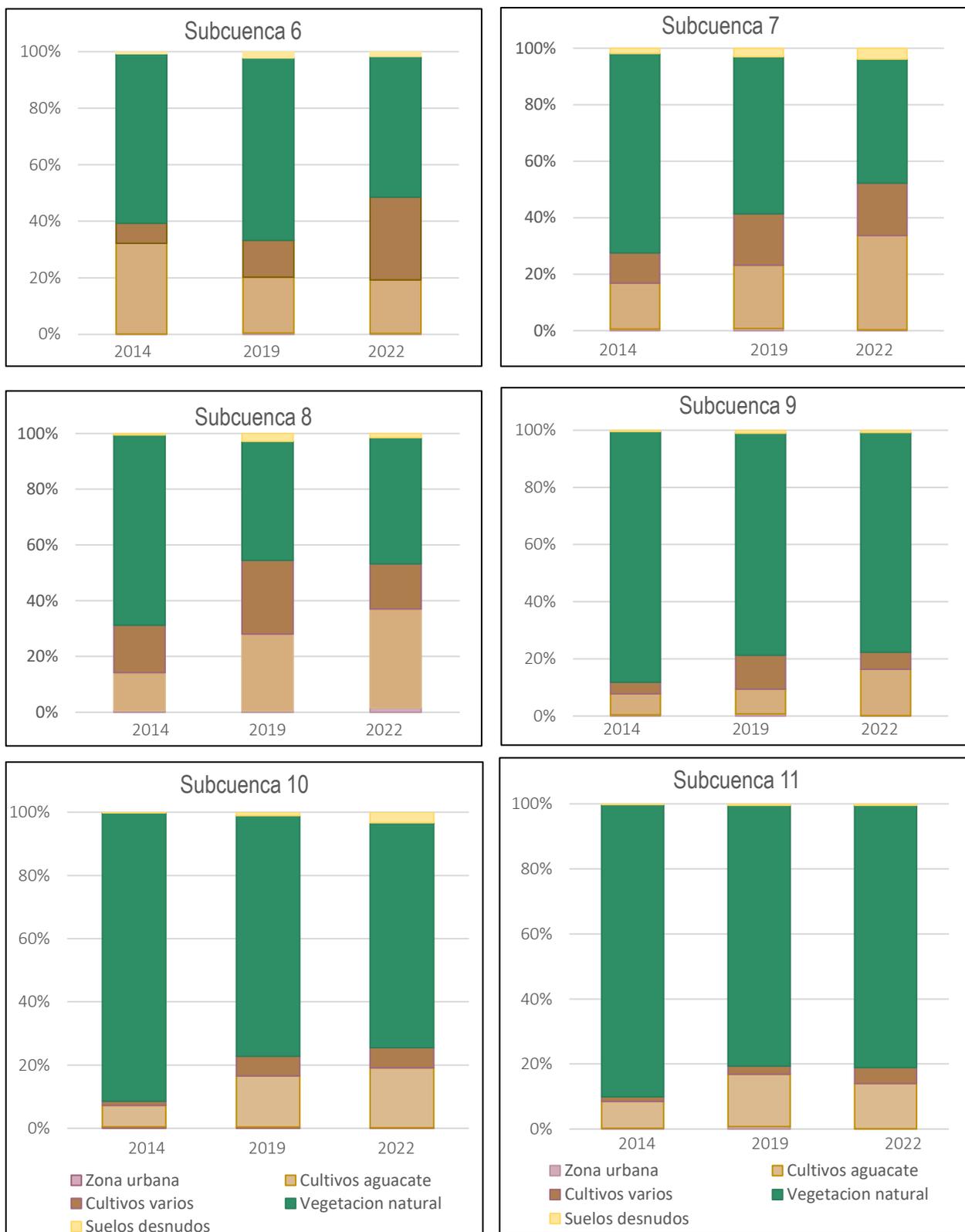
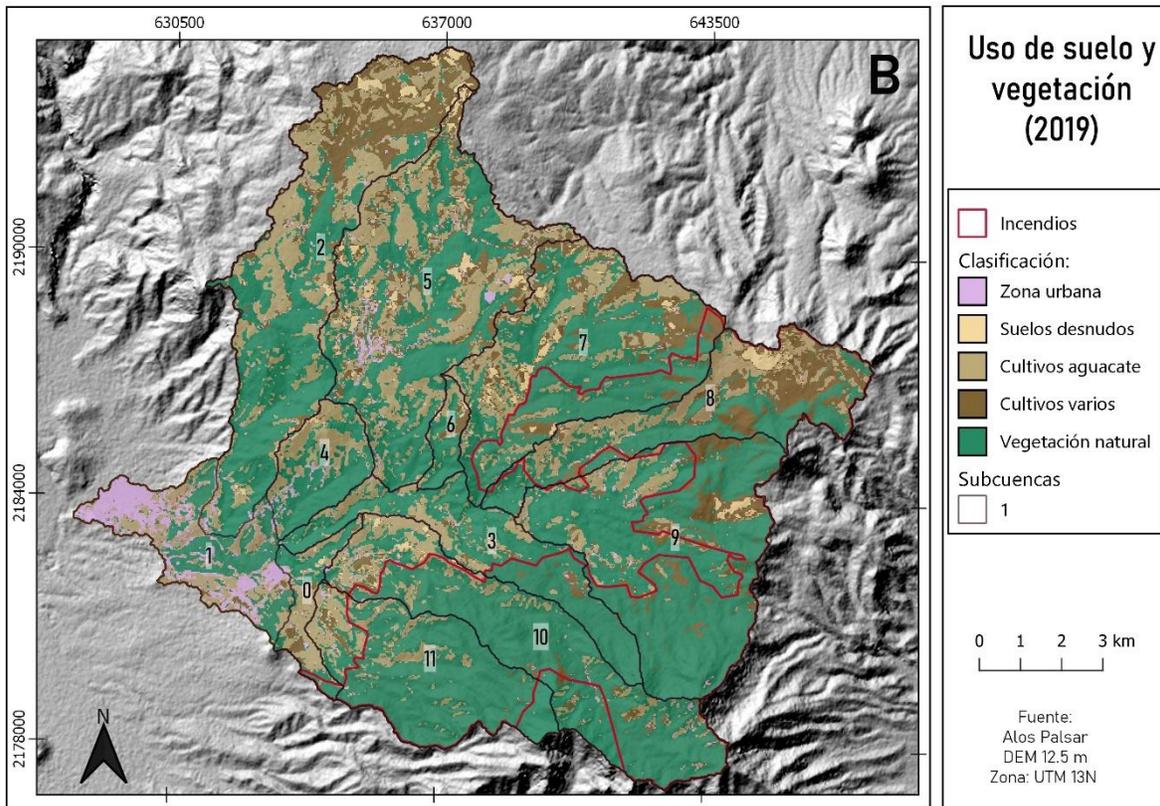
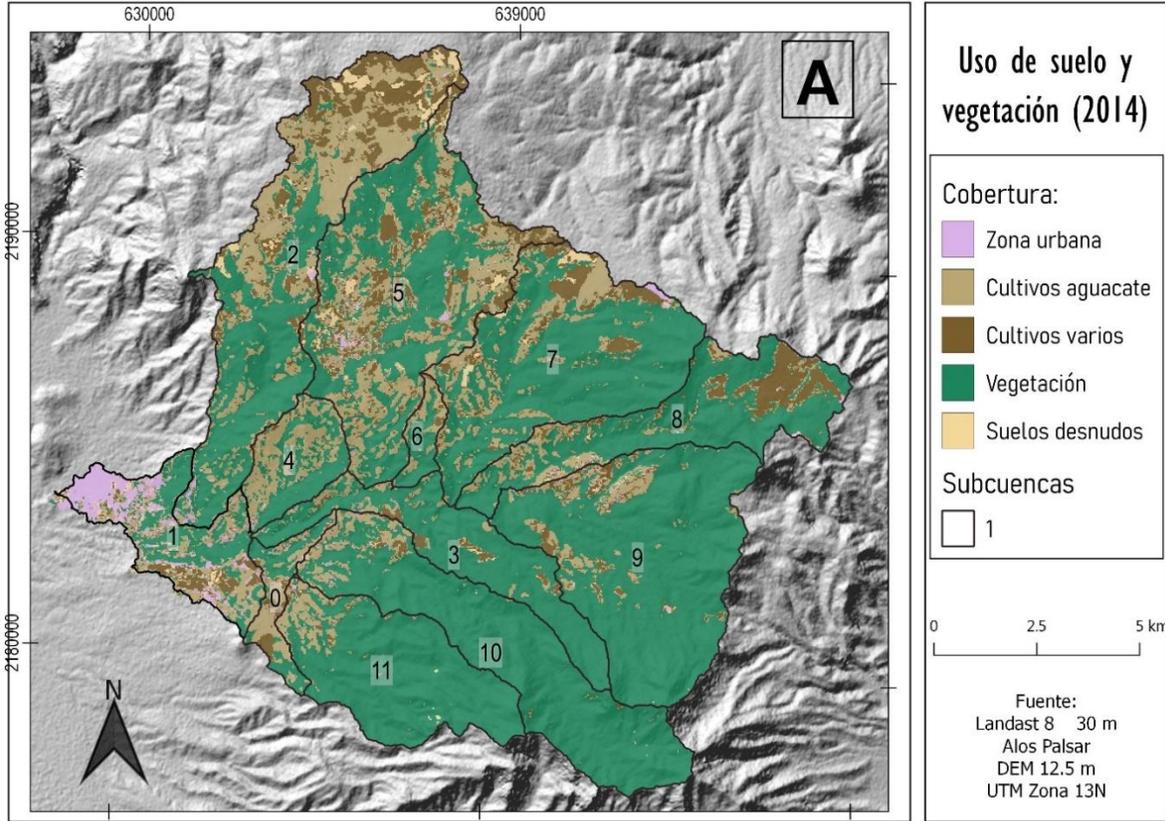


Figura 23: Gráficas que muestran los cambios ocurridos (%) para las diferentes coberturas del suelo en el periodo de 2014-2022, por cada subcuenca en la zona de estudio.



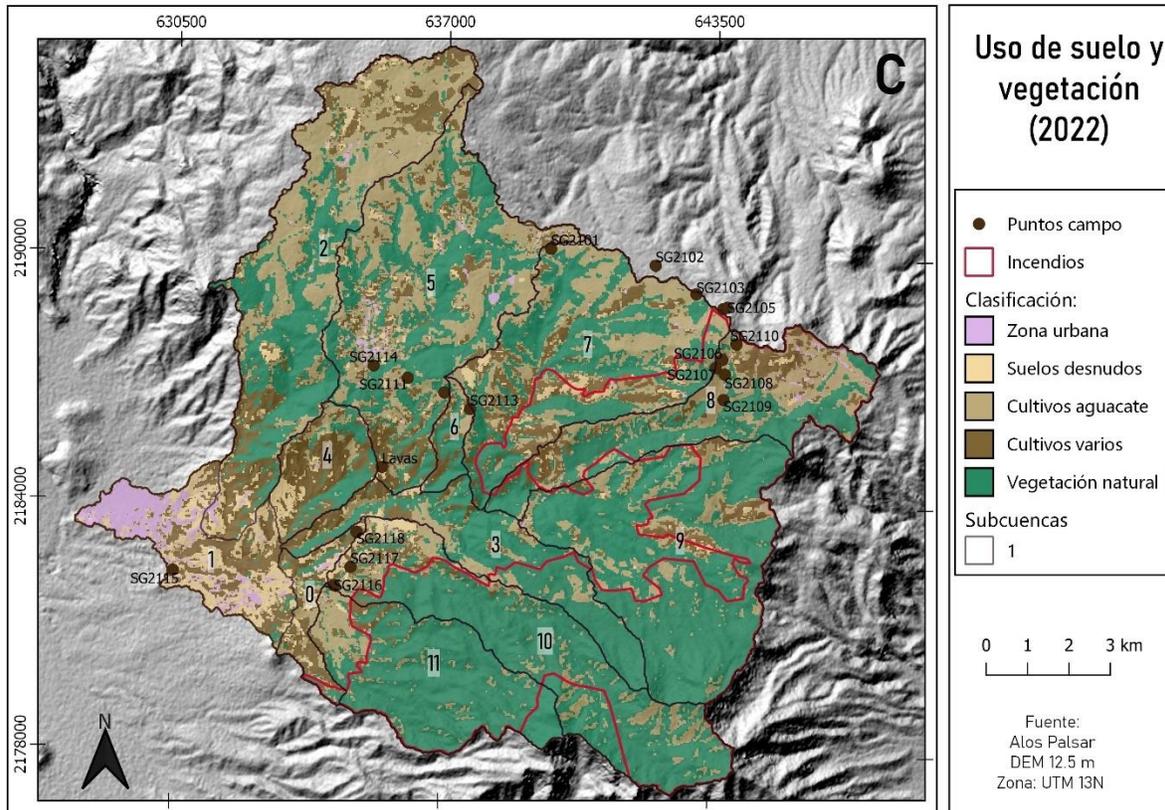
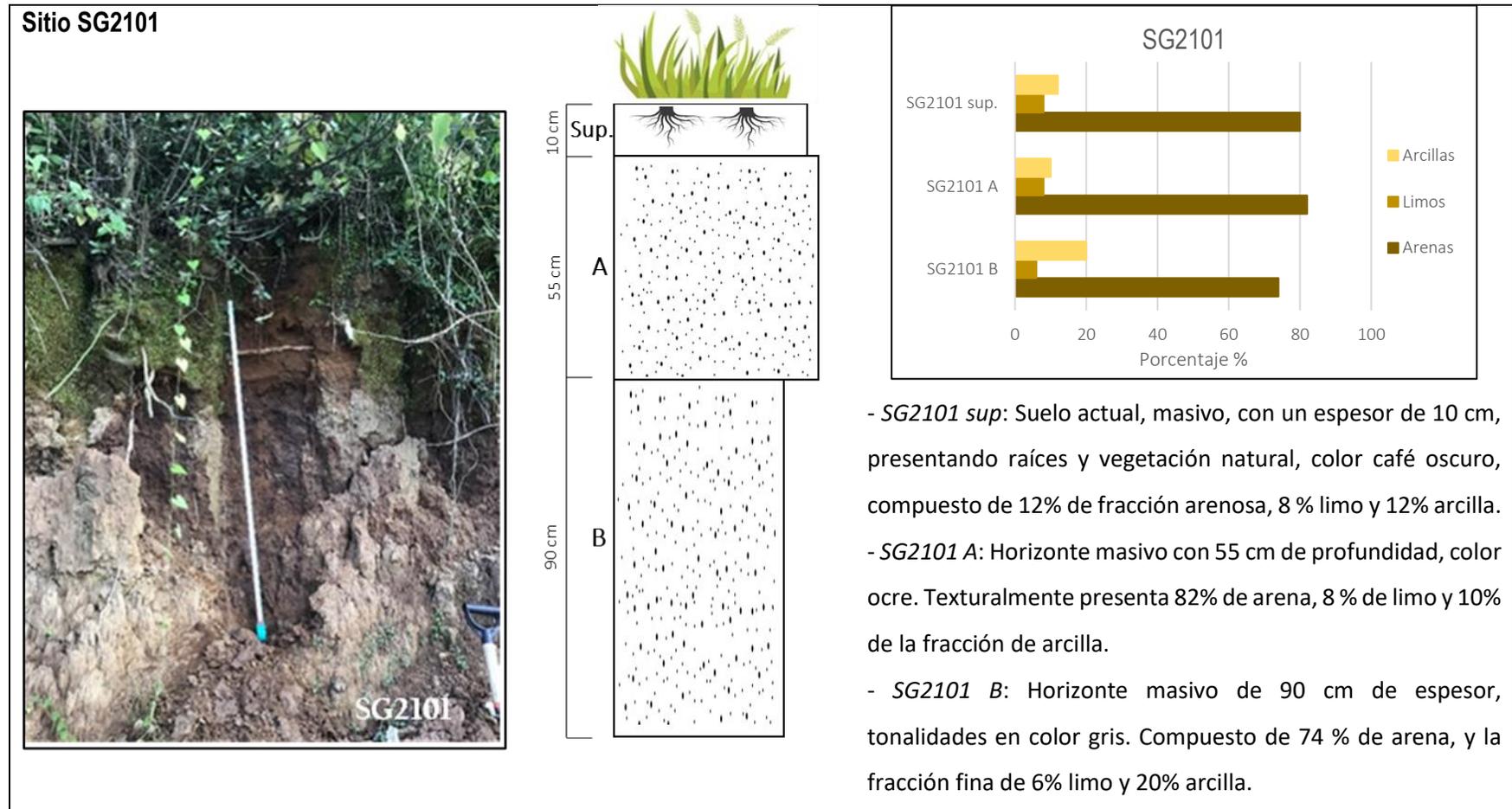


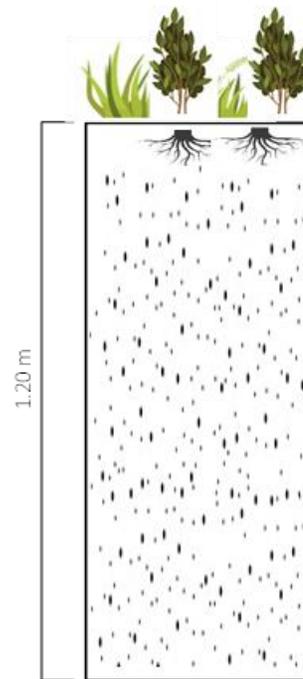
Figura 24: Mapas que muestran el análisis de cambios en el uso de suelo y vegetación en cada subcuenca, A) año 2014, B) año 2019 (fecha del evento) y C) año 2022.

5.4 Características texturales y granulométricas de los suelos en la cuenca de San Gabriel

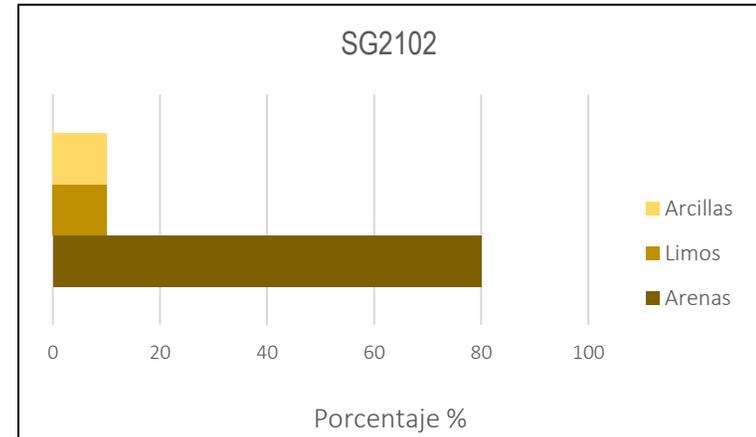
A continuación, se describen los depósitos estudiados y sus características texturales. El área de estudio consiste de depósitos volcanoclasticos asociados a la actividad del Volcán Cántaro, principalmente de depósitos de flujos piroclásticos de ceniza. Los suelos y paleosuelos aquí analizados se formaron en dichas secuencias.



Sitio SG2102

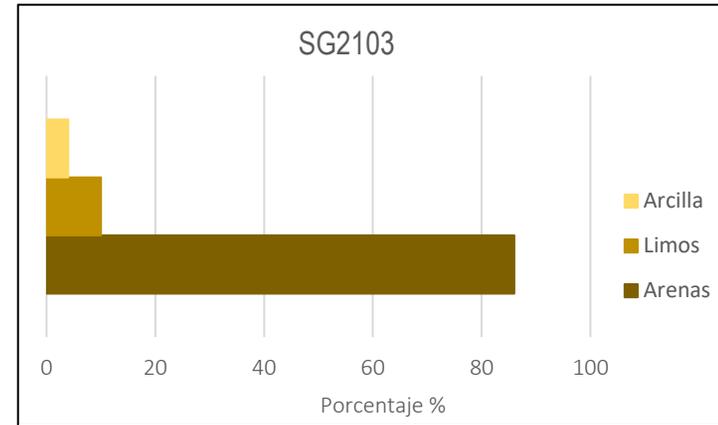
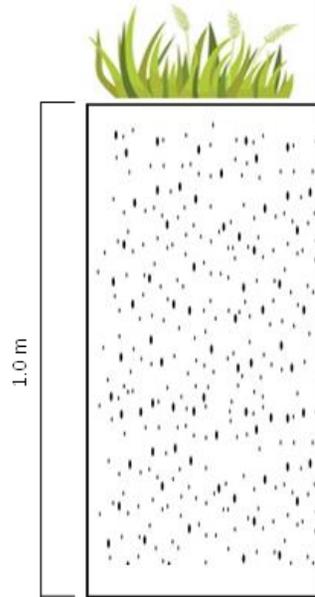


Escala: 20 cm



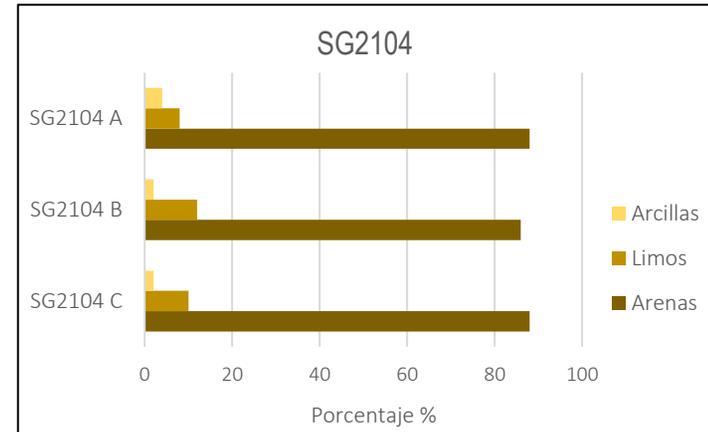
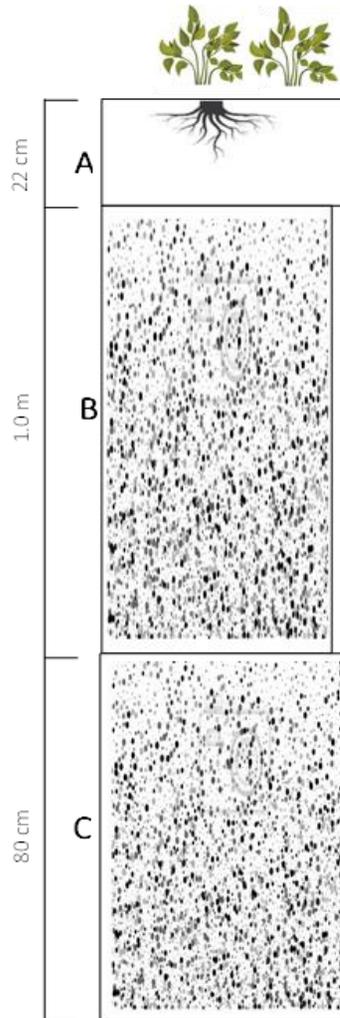
Depósito de 1.20 metros de espesor, con un único horizonte masivo, de color café oscuro, en la parte superficial se encuentra una vegetación natural. La muestra fue recolectada a los 20 cm de profundidad. Por la composición que presenta es un suelo arenoso, 80 % de arena, 10% de limo y 10% de arcilla, como se observa en la gráfica superior.

Sitio SG2103



Suelo masivo con un espesor de 1 metro, presentando vegetación natural en la superficie, color café oscuro. Texturalmente es un suelo con un porcentaje de arenas de 86%, limos 10% y la fracción arcilla está presente en un 4%.

Sitio SG2104



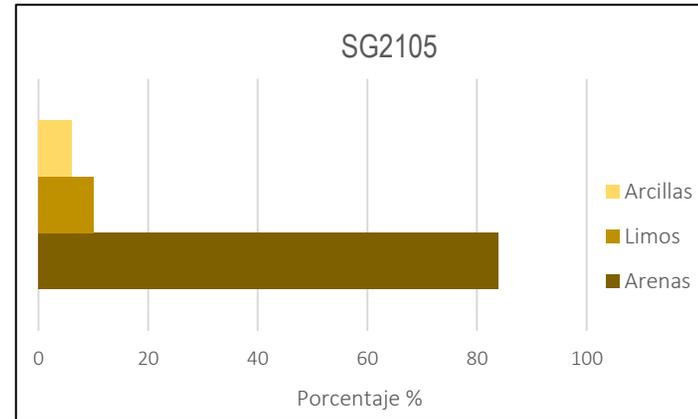
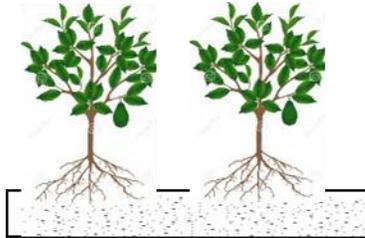
Afloramiento con espesor de 2 metros, distinguiendo 3 horizontes.

- *SG2104 A*: Espesor de 22 cm, masivo, de color rojizo a café, con poca vegetación en la parte superior. Contenido en arena de 88%, limos 8% y la fracción de arcilla en 4%.

- *SG2104 B*: Horizonte masivo de 1 metros de espesor, color rojizo. Las fracciones de arena, limo y arcilla están en un 86%, 12% y 2% respectivamente.

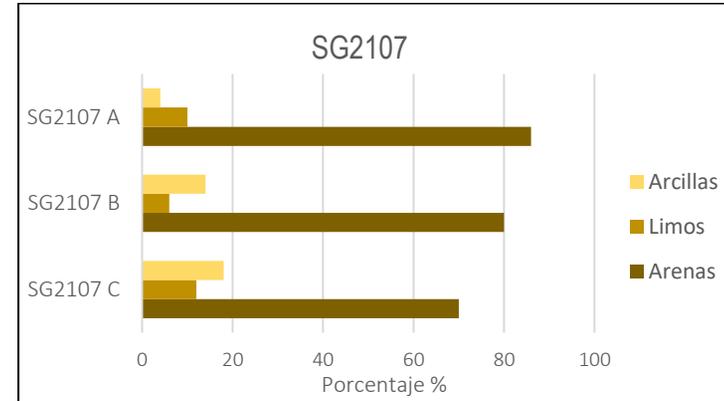
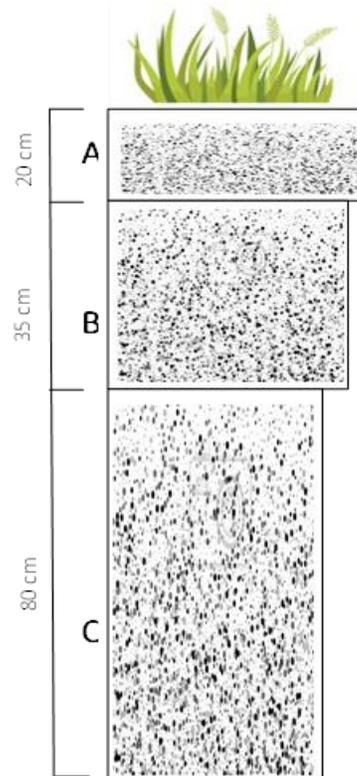
- *SG2104 C*: Horizonte masivo de mayor profundidad, que presenta un espesor de 80 cm, de tonalidades rojizas. En donde la arena predomina como composición en 88%, seguido de limo 10% y un porcentaje bajo de arcilla, 2%.

Sitio SG2105



Suelo de color café que pertenece al área de un cultivo de aguacate, mismo que fue afectado por los incendios del mes de mayo de 2019. Texturalmente se encuentra formado por 84% de arenas, 10% de limos y compuesto de 6% de arcillas.

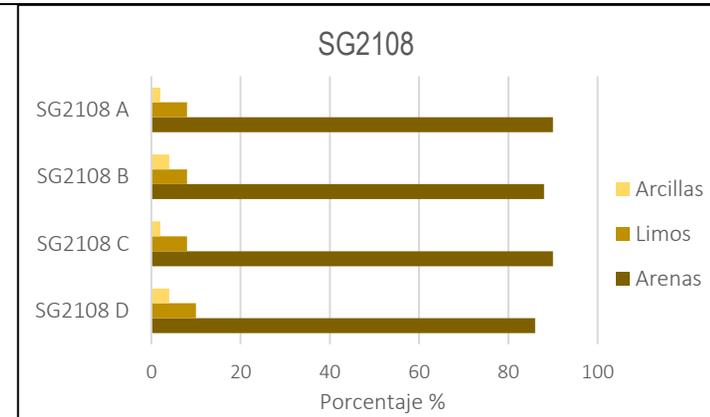
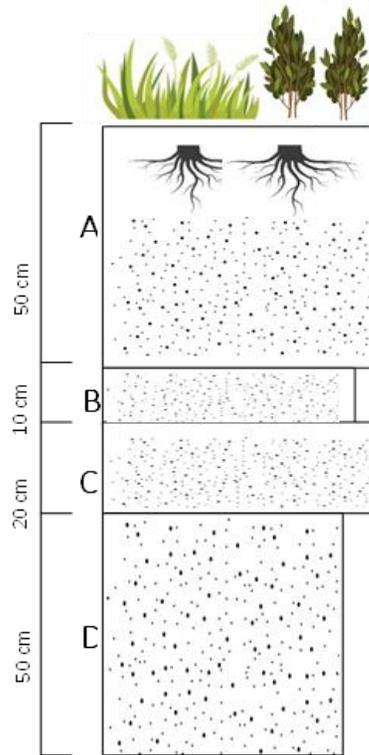
Sitio SG2107



Afloramiento son un espesor de 1.40 metros, con la formación de 3 horizontes:

- *SG2107 A*: Suelo masivo de 20 cm de espesor, con vegetación natural sobre la superficie, formada de 86% de arenas, 10% de limos y 4% de arcillas. El color que presenta es café oscuro.
- *SG2107 B*: Horizonte masivo, presentando 35 cm de espesor, con tonalidades rojizas a café, la arena está presente en un 80%, el limo en un 6% y la arcilla 14%.
- *SG2107 C*: Horizonte más profundo del perfil con un espesor de 80 cm, el color que se observa es café-amarillo. Texturalmente la fracción de arena es de 70%, mientras que el limo es de 12% y la arcilla en un 18%.

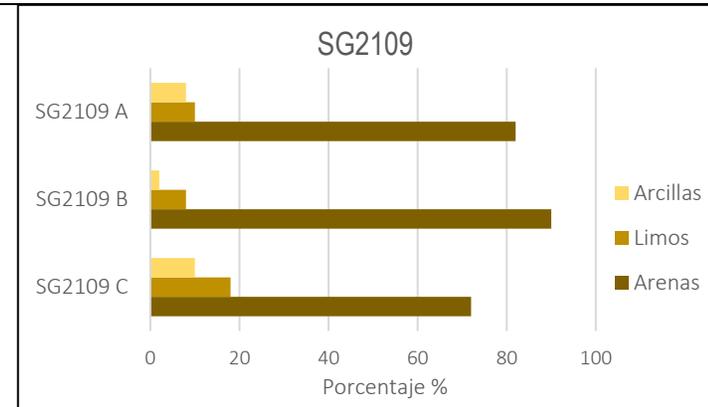
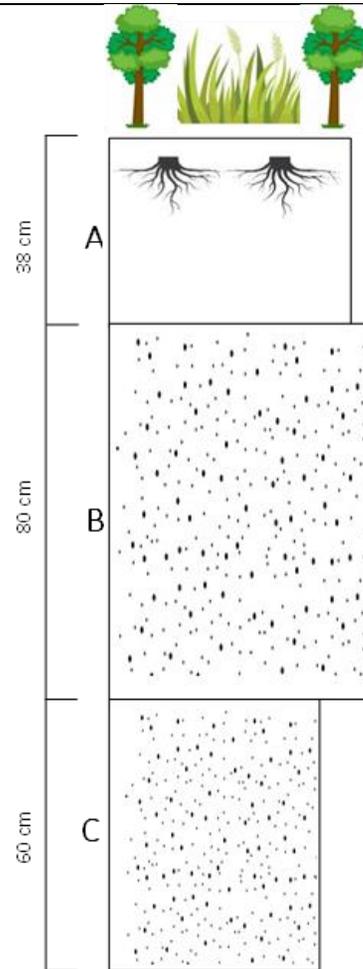
Sitio SG2108



Depósito de 1.30 metros de espesor, con 4 horizontes:

- *SG2108 A*: Capa superior masiva, de 50 cm de espesor, con vegetación natural, con gran cantidad de raíces el color que presenta es café oscuro. El contenido de arena es de 90%, mientras que la arcilla se presenta en un 2%.
- *SG2108 B*: 10 cm de espesor en esta capa masiva B, suelo arenoso, hay porciones que presentan un color negro.
- *SG2108 C*: Horizonte masivo, 20 cm de espesor, el color presente es más claro que en las capas superiores, la textura es arena 90%, 8% de limo y 2% de arcilla.
- *SG2108 D*: Capa más profunda, con un espesor de 50 cm, de color café claro, donde la fracción de arena es mayor (86%) 10% de limo, mientras que la fracción de arcilla es de 4%.

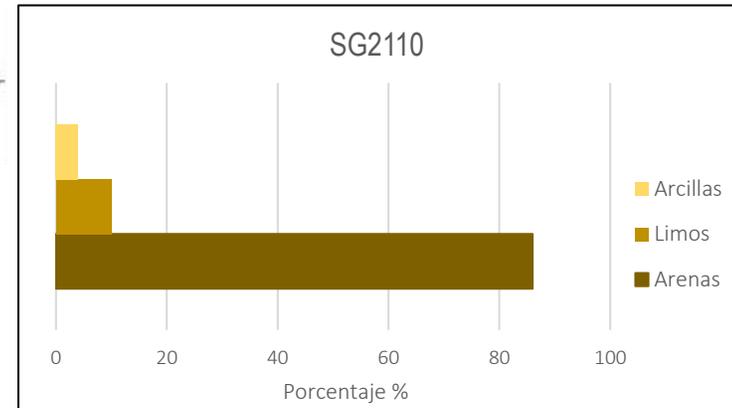
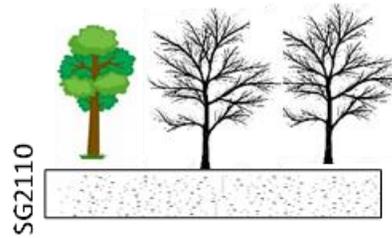
Sitio SG2109



Depósito con un espesor presente de 1.80 metros constituido por 3 horizontes:

- *SG2109 A*: horizonte superficial masivo de 38 cm de espesor, con vegetación natural, presentando un color café oscuro, con la presencia de muchas raíces. El porcentaje de arena es de 82%, 10% de limo y 8% de arcilla.
- *SG2109 B*: Paleosuelo masivo con un espesor de 80 cm, la coloración del suelo es ocre. Está constituido por el 90% de arena, 8% de limo y 2% de arcilla.
- *SG2109 C*: El horizonte C tiene un espesor de 60 cm, de color café claro. Presenta una fracción de arena menor en comparación con los horizontes suprayacentes (72%), la fracción fina es de 18% (limos y arcillas).

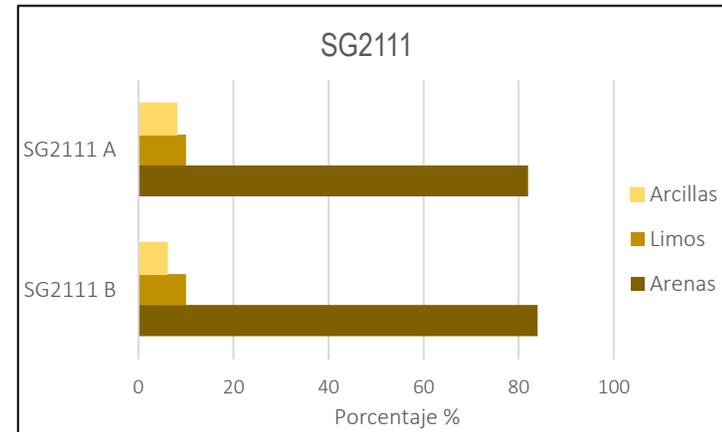
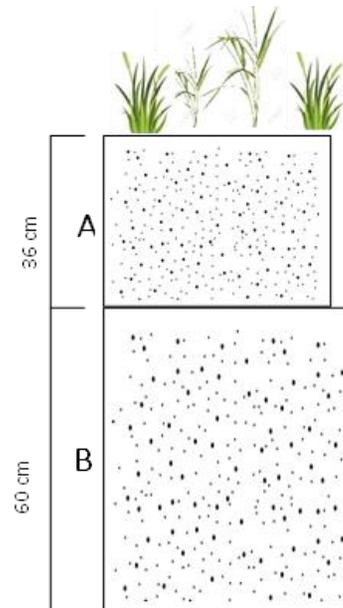
Sitio SG2110



Suelo que pertenece al área que fue afectada por los incendios del mes de mayo de 2019, con un color café oscuro. Se obtuvo solo una muestra. Se puede observar vegetación y troncos de árboles quemados (recuadro amarillo).

La textura de la muestra obtenida es de: 86% de arenas, 10% de la fracción de limos y 4% para la fracción arcilla.

Sitio SG2111

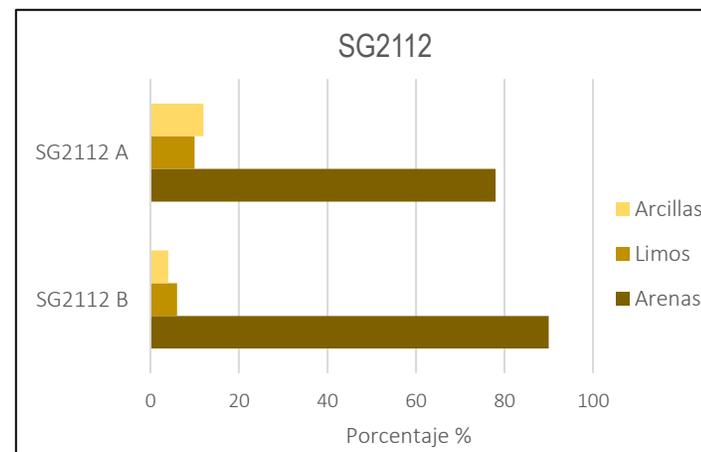
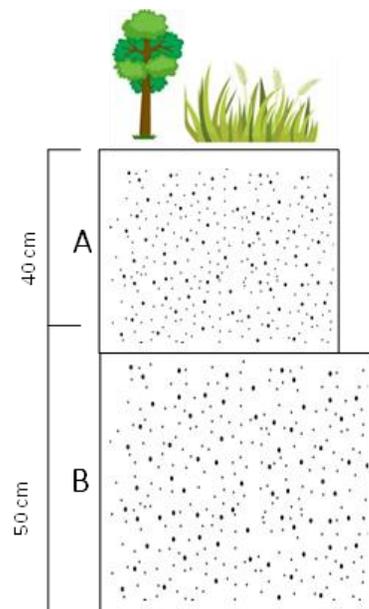


Depósito de 1m de espesor, con dos horizontes:

- *SG2111 A*: Suelo masivo, color café, en la parte superficial se desarrolla vegetación natural, como el zacatonal, generalmente asociado a encino. Para la textura presenta 82% de arenas, 10% de limos y 8% de arcillas.

- *SG2111 B*: Horizonte masivo de color café oscuro, presenta un espesor de 60 cm, y constituido por el 84% de arena, 10% de limos y 6% de la fracción más fina, arcilla.

Sitio SG2112

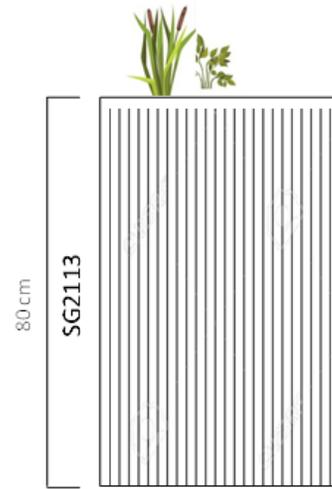


Suelo masivo de 90 cm de espesor compuesto de dos horizontes:

- *SG2112 A*: Horizonte superior masivo con espesor de aproximadamente 40 cm, presenta vegetación natural, color café oscuro. Texturalmente está compuesto de 78% de arenas, 10% de limos y 12% de arcillas.

- *SG2112 B*: Suelo arenoso masivo, 50 cm de espesor, el color que presenta es más claro que el horizonte superior. Las fracciones de arena, limo y arcilla es de 90%, 6% y 4% respectivamente.

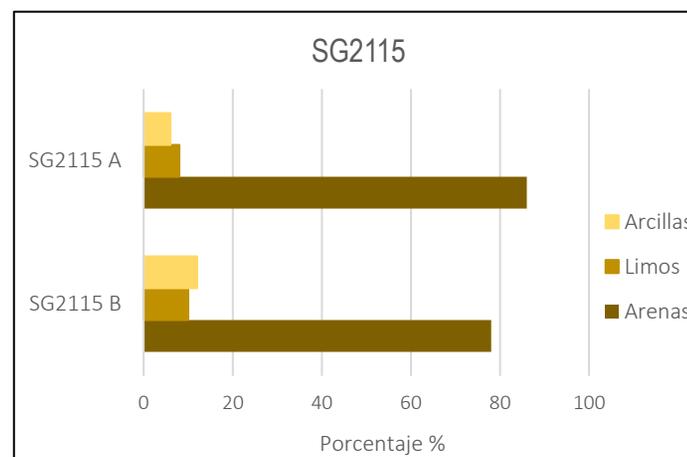
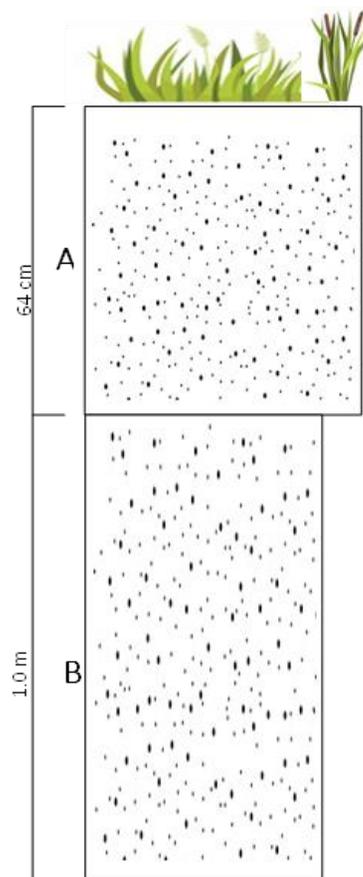
Sitio SG2113



Depósito de Ignimbrita soldada con poco suelo y vegetación desarrollada, presenta un espesor de 80 cm aproximadamente, con un color ocrea a amarillo.

Se recolectó una sola muestra de roca.

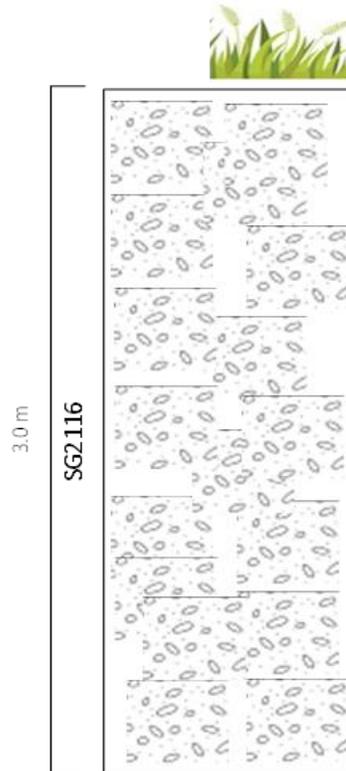
Sitio SG2115



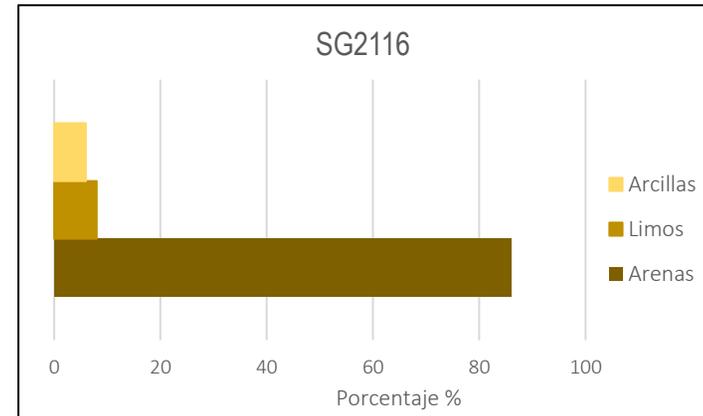
Afloramiento de 1.60 metros, compuesto por dos horizontes:

- *SG2115 A*: Horizonte A masivo de 65 cm de espesor, con vegetación natural en la superficie, el color es café claro, presenta del 86% de arenas, 8% de limos y 6% de arcillas.
- *SG2115 B*: Horizonte masivo más profundo, con 1 metro de espesor, color café claro. El porcentaje para las fracciones de arena, limo y arcilla es 78%, 10% y 12% respectivamente.

Sitio SG2116



Escala: 40 cm =1 cm



Depósito perteneciente a un flujo de escombros cohesivo, con espesor de 3 metros, masivo, de matriz soportada, con líticos subangulosos, embebidos en abundante matriz. Coloraciones en café oscuro y claro.

La matriz consiste de 86 % de arena, 8% de limo y un contenido de la fracción arcillosa de 6%.

5.5 Características físicas y químicas de los suelos y del flujo de escombros

En la siguiente tabla se describen los resultados de los parámetros obtenidos para cada suelo y para cada horizonte que lo conforma.

Tabla 8: Resultados obtenidos en laboratorio para cada muestra. Sb: número de subcuenca en donde se ubica la muestra, %H: porcentaje de humedad, M.O: materia orgánica, ρ : densidad real, A: arenas, L: limos y R: arcillas, y el uso de suelo al que pertenecen.

Muestra	Sb	Uso de suelo	Parámetros				Textura		
			%H	pH	%M.O.	ρ (g/cm ³)	%A	%L	%R
SG01 sup.	7	Vegetación natural	27.65	5.43	5.90	1.98	80	8	12
SG01A	7	Vegetación natural	44.83	6.25	1.19	1.99	82	8	10
SG01B	7	Vegetación natural	22.47	6.16	1.00	2.45	74	6	20
SG02	7	Cultivo de aguacate	45.12	6.70	7.93	1.72	80	10	10
SG03	7	Vegetación natural	43.81	6.55	2.82	2.16	86	10	4
SG04A	7	Vegetación natural	56.48	6.74	8.15	2.05	88	8	4
SG04B	7	Vegetación natural	52.75	7.08	3.76	1.86	86	12	2
SG04C	7	Vegetación natural	78.45	6.89	4.90	2.10	88	10	2
SG05	7	Cultivo de aguacate	37.87	6.27	10.20	2.42	84	10	6
SG07A	8	Vegetación natural	59.12	6.90	10.94	2.20	86	10	4
SG07B	8	Vegetación natural	52.10	6.03	2.90	2.27	80	6	14
SG07C	8	Vegetación natural	38.17	6.44	0.76	2.02	70	12	18
SG08A	8	Vegetación natural	33.04	6.83	3.91	1.29	90	8	2
SG08B	8	Vegetación natural	36.02	6.46	8.17	2.77	88	8	4
SG08C	8	Vegetación natural	25.22	6.94	4.47	1.88	90	8	2
SG08D	8	Vegetación natural	37.40	7.40	1.50	3.40	86	10	4
SG09A	8	Vegetación natural	47.18	6.65	8.44	2.32	82	10	8
SG09B	8	Vegetación natural	52.77	6.58	4.16	1.82	90	8	2
SG09C	8	Vegetación natural	47.07	6.54	1.21	2.64	72	18	10
SG10	8	Cultivo de aguacate	62.67	6.66	6.70	1.52	86	10	4
SG11A	5	Vegetación natural	46.41	6.96	1.60	2.65	82	10	8
SG11B	5	Vegetación natural	73.45	6.84	0.00	2.57	84	10	6
SG12A	5	Cultivo de aguacate	31.78	6.94	1.44	2.07	78	10	12
SG12B	5	Cultivo de aguacate	28.24	8.38	0.35	1.80	90	6	4
SG115A	1	Suelo desnudo	16.59	7.04	1.28	2.35	86	8	6
SG115B	1	Suelo desnudo	16.10	8.13	0.32	3.12	78	10	12
SG16matriz	10	Cultivos varios	46.01	7.69	0.00	2.80	86	8	6
SG16cultivo	10	Cultivos varios	27.48	6.88	1.39	3.24	78	8	14

En la figura 25 se observa gráficamente los resultados de los parámetros obtenidos en laboratorio. De acuerdo con el análisis de porcentaje de humedad, se observa que suelos con una cobertura de vegetación natural como las muestras: SG2104, SG2107, SG2109 y SG2111 presentan valores en un rango

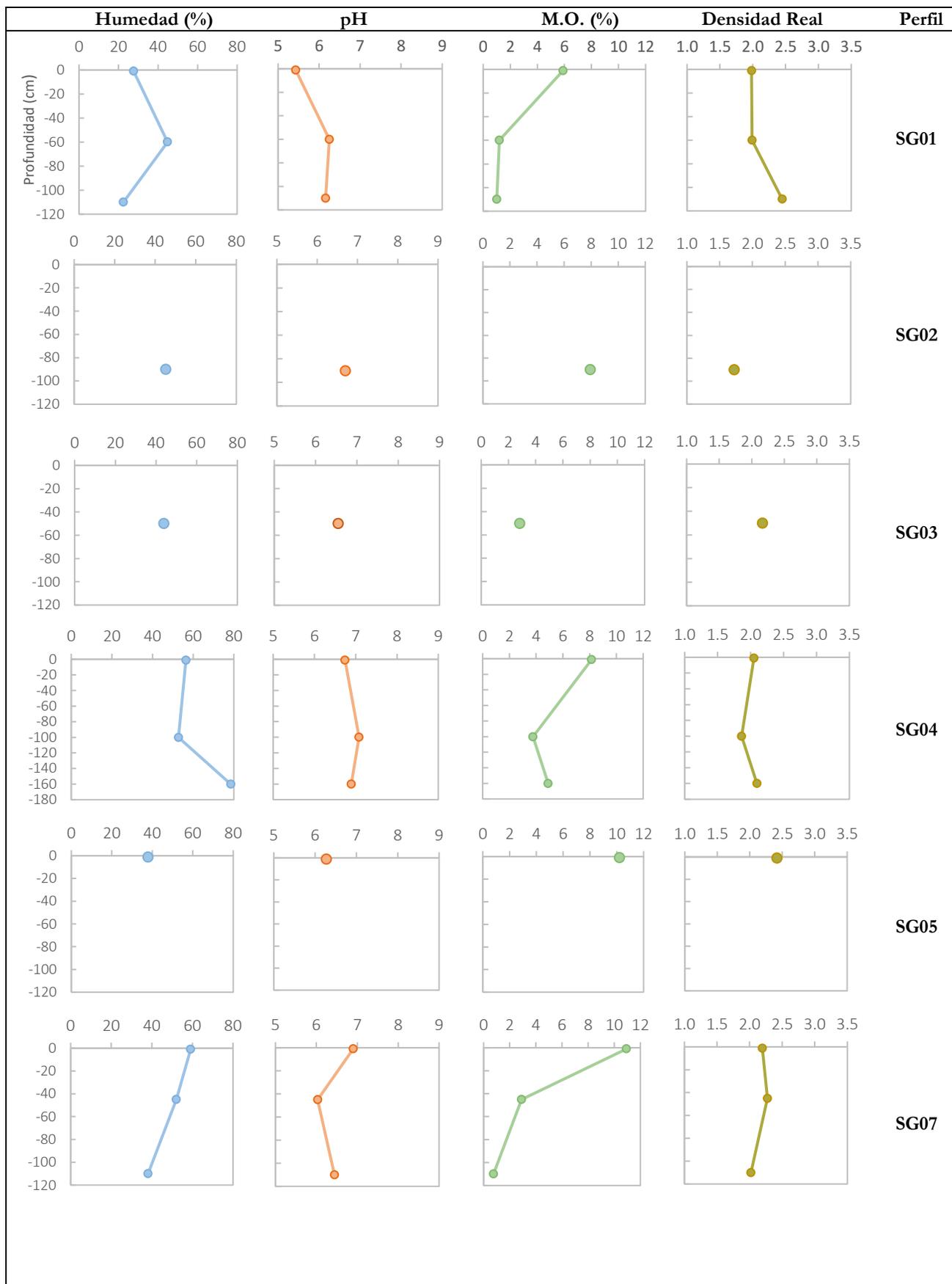
de 47% hasta un 78%, mientras que suelos bajo el uso de cultivo de aguacate (*SG2102, SG2105, SG21012*) el rango de porcentaje de humedad es de 28% a 45%. Con respecto a el suelo destinado a cultivos varios (*SG2116 cultivo*), el valor es de 27. 4%, finalmente para la cobertura de suelo desnudo (*SG2115*) el contenido de humedad es de 16.5 %.

En cuanto al pH, los horizontes de los suelos desarrollados con vegetación natural (*SG2101, SG2103*) son suelos moderadamente ácidos ya que presentan un rango de valores de 5.4 a 6.5, las muestras *SG2104, SG2107, SG2108, SG2109* y *SG2111*, con la misma cobertura son suelos neutros, con valores que van de 6.6 a 7.3; también la muestra *SG2116* es un suelo neutro, pero se encuentra dentro de una zona de cultivos varios. Los suelos que presentan valores de 7.4 a 8.5 son clasificados como alcalinos, siendo la muestra *SG2115*, desarrollada en un suelo desnudo la que se encuentra dentro de esta categoría.

Para los resultados de contenido de la materia orgánica, generalmente se observa que los valores van disminuyendo con la profundidad, excepto en las muestras *SG2104* y *SG2108* en donde el horizonte *B* aumenta el porcentaje de M.O con respecto al horizonte superficial *A*. Suelos con una vegetación natural como *SG2101* en el horizonte superficial tiene un valor de 5.9%, el cual disminuye en los horizontes más profundos con valores de 1%; el suelo correspondiente a *SG2107* destaca por su alto contenido en materia orgánica y presenta las siguientes características: el primer horizonte está enriquecido en materia orgánica con 10.94%, el valor disminuye notablemente en el horizonte *B* con 2% y vuelve a disminuir en el tercer horizonte *C*, presentando 0.76%.

Muestras obtenidas dentro de cultivos de aguacate (*SG2102, SG2105* y *SG2110*), el contenido de materia orgánica se encuentra en un intervalo de 6.7% a 10.2%, mientras que *SG2112* bajo el mismo uso de suelo tiene un valor menor de 1.4%, el cual disminuye en el horizonte inferior hasta un 0.3%. Por otra parte, la muestra obtenida en el uso de cultivos varios (*SG2116 cultivo*) presenta 1.3% de M.O y para el suelo desnudo (*SG2115*), el horizonte superficial *A* contiene 1.2%, disminuyendo en el horizonte *B* con 0.3%.

Finalmente, para el parámetro de densidad real de los agregados, aquellos suelos que presentan una vegetación natural tienen una densidad comprendida entre 1.3 a 2.5 g/cm³. Suelos bajo una cobertura de cultivo de aguacate presentan valores en un rango de 1.5 -2.4 g/cm³, por ejemplo, en la muestra *SG2112*, la densidad de las partículas es más alta en la superficie y disminuye en el horizonte inferior, con 2 g/cm³ y 1.8 g/cm³ respectivamente. Con respecto a los suelos desnudos (*SG2115*), estos valores de densidad son de 2.3 g/cm³ para el horizonte *A* y 3.1 g/cm³ para el horizonte *B*.



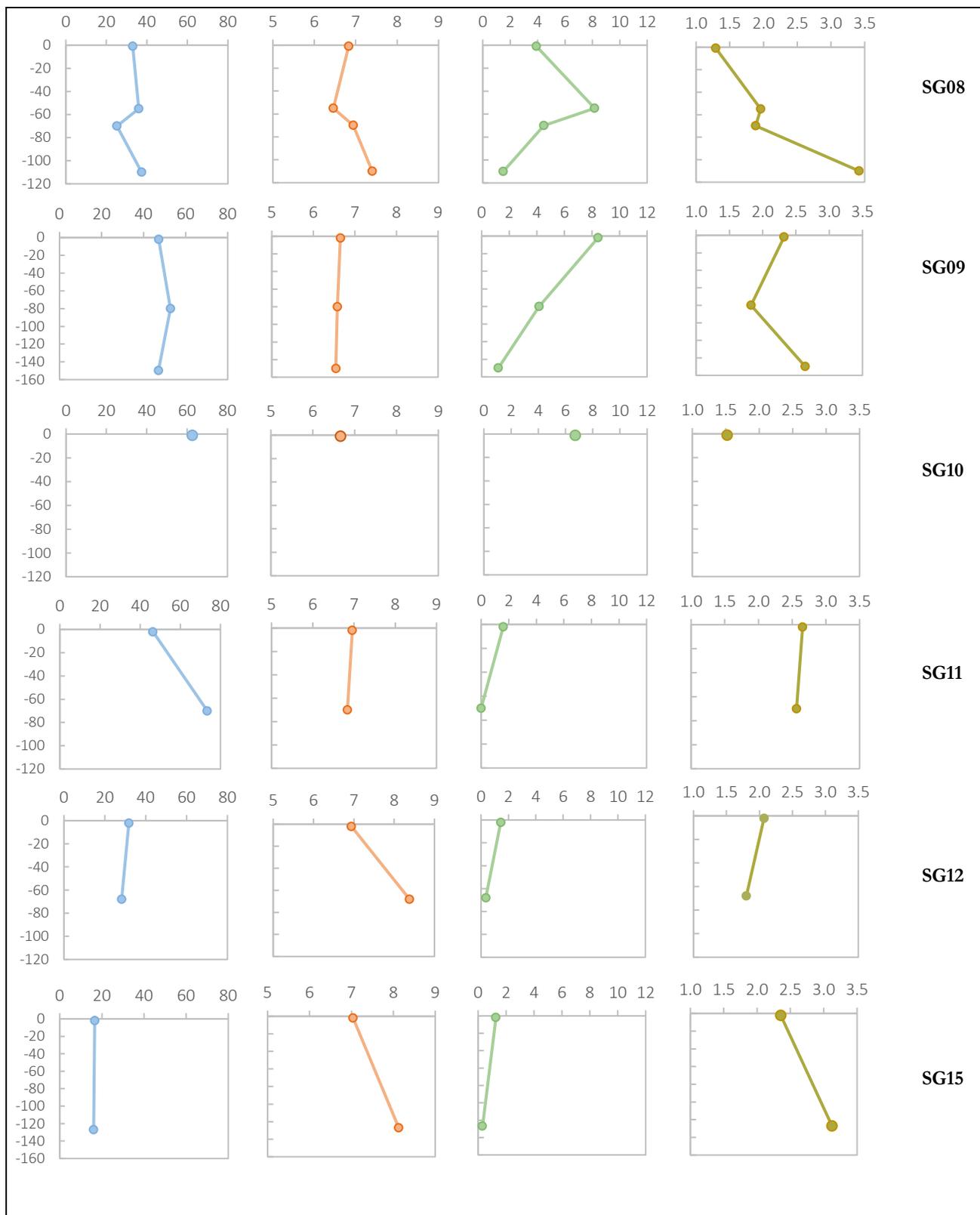


Figura 25: Gráficas de los resultados obtenidos en laboratorio: Porcentaje de Humedad, pH, M.O y densidad real.

5.5.1 Textura

Con base en el análisis granulométrico, las muestras analizadas muestran un contenido de arena mayor al 70%, con una fracción de limo en un rango de valores de 6 a 12%, mientras que la fracción arcillosa varía del 2-20%. Suelos como aquellos que pertenecen a las muestras *SG2101* (vegetación natural) presentan contenido de arcilla de hasta el 20% en el horizonte más inferior, menor contenido en limo 6% y la fracción arenosa es de 74%, seguido de la muestra *SG2107* (vegetación natural) en donde los horizontes *B* y *C* presentan valores de 18 y 14% de arcilla respectivamente, mientras que el horizonte superior, presenta un 4% en contenido de arcilla.

Por otra parte, la muestra denominada como *SG2104* (vegetación natural) posee solo el 4% de arcilla en la parte superior y disminuye a un 2% en los dos horizontes inferiores, la porción de limo es de 8 a 12%, y la fracción de arena es similar en los 3 horizontes con 86-88%. Con respecto al suelo *SG2112* (cultivos de aguacate), el horizonte *A* está conformado por 12% de arcilla, 10% de limo y 78% de arena, el horizonte inferior *B* disminuye considerablemente el contenido en la fracción fina hasta un 4%, y aumenta por lo tanto en el porcentaje de arena con 90%. El depósito de flujo de escombros *SG2116* (cultivos varios) tiene una textura de 86% de arena, 8% de limo y un contenido de arcilla del 6%. Para clasificar a estos suelos se utilizó el triángulo textural de acuerdo con el USDA (Figura 26), lo que nos indica que se trata de suelos arenosos- franco arenosos.

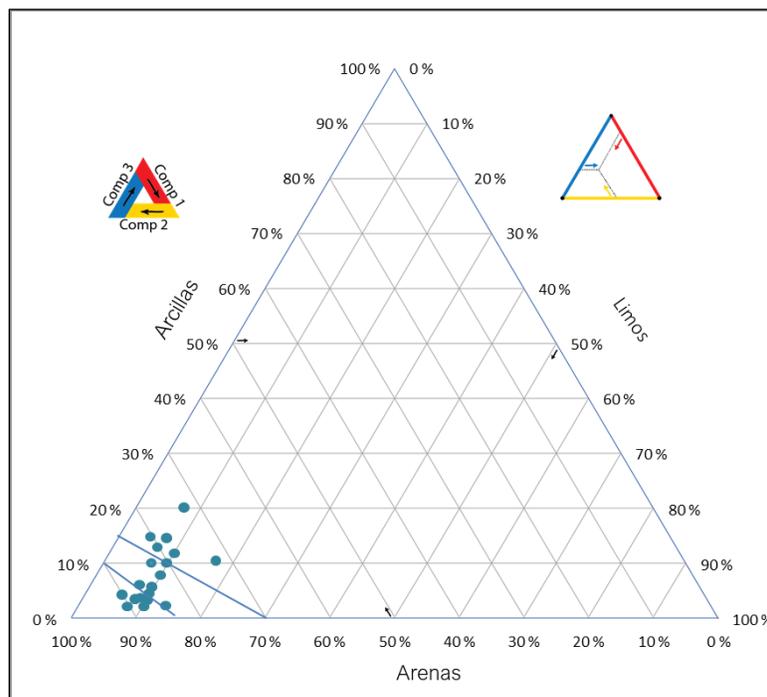


Figura 26: Triángulo de texturas que visualiza la granulometría de las muestras (% de arena, limo y arcilla).

5.6 Susceptibilidad a la erosión en la cuenca San Gabriel

5.6.1 Factor C

A cada tipo de uso de suelo y vegetación presente en la cuenca San Gabriel, de acuerdo a la información de la Tabla 3, se le asignó un valor para el factor C como se muestra en la Tabla 9, donde el valor de C para áreas incendiadas fue propuesto por Ortiz- Rodríguez (2018).

Tabla 9: Valores utilizados para el Factor C para cada cobertura del suelo.

Cobertura del suelo	Factor C
Zona urbana	n.c
Cultivos de aguacate	0.30
Cultivos varios	0.10
Vegetación natural	0.001
Suelos desnudos	0.90
Áreas incendiadas	0.95

5.6.2 Factor K

La tabla 10 muestra los resultados obtenidos para las muestras analizadas. Sitios como: *SG2112 A y B* suelo perteneciente a cultivo de aguacate, *SG2115 A* suelo desnudo, *SG2116* muestra en zona de cultivos varios, *SG2109C* y *SG2101 A y B* con cobertura de vegetación natural, son suelos que presentan una mayor erodibilidad con un valor de $K > 0.022$, en comparación a los demás sitios muestreados como: *SG2104A*, *SG2107A*, *SG2108B*, *SG2109A*, suelos con vegetación natural y *SG2102*, *SG2105*, suelos en cultivo de aguacate, los cuales presentan valores cerca de 0.014.

La tendencia que muestra el factor (K) es aumentar con la profundidad, a excepción de algunas muestras como *SG211* y *SG2112*, donde el horizonte superior muestra una erodibilidad mayor. La clasificación de K se encuentra entre un rango de bajo a moderado. El contenido de materia orgánica (SOM) es uno de los factores clave para el cálculo de erodibilidad debido a que otorga una mejor estructura del suelo.

Tabla 10: Resultados de Factor K por medio del programa Kuery 1.5 (Borselli, 2012); Md: moderado/medio, SOM: materia orgánica.

Muestras	Uso de suelo	SOM (%)	K	Clasificación
SG2101 sup.	Vegetación natural	5.90	0.0198	Bajo
SG2101 A	Vegetación natural	1.19	0.0244	Md
SG2101 B	Vegetación natural	1.00	0.0230	Md
SG2102	Cultivo Aguacate	7.93	0.0148	Bajo
SG2103	Vegetación natural	2.82	0.0235	Md
SG2104 A	Vegetación natural	8.15	0.0147	Bajo

SG2104 B	Vegetación natural	3.76	0.0202	Md
SG2104 C	Vegetación natural	4.90	0.0214	Md
SG2105	Cultivo Aguacate	10.20	0.0149	Bajo
SG2107 A	Vegetación natural	10.94	0.0147	Bajo
SG2107 B	Vegetación natural	2.90	0.0226	Md
SG2107 C	Vegetación natural	0.76	0.0225	Md
SG2108 A	Vegetación natural	3.91	0.0198	Bajo
SG2108 B	Vegetación natural	8.17	0.0147	Bajo
SG2108 C	Vegetación natural	4.47	0.0205	Md
SG2108 D	Vegetación natural	1.50	0.0236	Md
SG2109 A	Vegetación natural	8.44	0.0149	Bajo
SG2109 B	Vegetación natural	4.16	0.0199	Bajo
SG2109 C	Vegetación natural	1.21	0.0265	Md
SG2110	Cultivo Aguacate	6.70	0.0172	Bajo
SG2111 A	Vegetación natural	1.60	0.0227	Md
SG2111 B	Vegetación natural	0.00	0.0221	Md
SG2112 A	Cultivo Aguacate	1.44	0.0257	Md
SG2112 B	Cultivo Aguacate	0.35	0.0226	Md
SG2115 A	Suelo desnudo	1.28	0.0223	Md
SG2115 B	Suelo desnudo	0.32	0.0200	Md
SG2116 matriz	Cultivos varios	0.00	0.0229	Md
SG2116 cultivo	Cultivos varios	1.39	0.0232	Md

Los valores obtenidos se promediaron por cada tipo de uso de suelo y se utilizaron para transformar el mapa de uso de suelo para el año 2022 a un mapa ráster de valor de K. En el mapa los valores más bajos (0.017) se observan en la vegetación natural, ubicada principalmente en la parte sur y sureste de la cuenca. Seguido de un valor del factor K de 0.0223 perteneciente a áreas de suelos desnudos.

Finalmente, las áreas que presentan valores más altos de factor K de 0.0227 y 0.0230, corresponden a zonas de cultivos varios y zonas de cultivo de aguacate respectivamente, en la porción norte y este de la cuenca y asociados a la operación de labranza del suelo.

5.6.3 Mapa de susceptibilidad a la erosión en la cuenca San Gabriel

En la figura 27 se muestra el mapa de susceptibilidad a la erosión resultante de integrar los factores *K*, *C* y *LS*. Las subcuencas que presentan una mayor susceptibilidad a la erosión se ubican en su mayoría en la porción norte, y son: la subcuenca 0, la porción este de la subcuenca 1 (representadas en color rojo), las laderas al sur de la subcuenca 4, parte central de la subcuenca 7 y en la subcuenca 8, en estas zonas de susceptibilidad alta se desarrolla el uso de suelo destinados a cultivos varios y de aguacate, y suelos desnudos; también se presentan pendientes en las laderas mayores a 45°. Las susceptibilidades a la erosión moderadas o medias (color amarillo) se distribuyen espacialmente a lo largo de las subcuencas

2, 5, 6 y 7. Para la subcuenca 3, la porción al oeste desarrolla una erosión de moderadas a altas, y en el sector sur estas disminuyen a zonas con erosión baja. Zonas con muy baja susceptibilidad corresponden con las subcuencas 9, 10 y 11, en donde domina la vegetación natural.

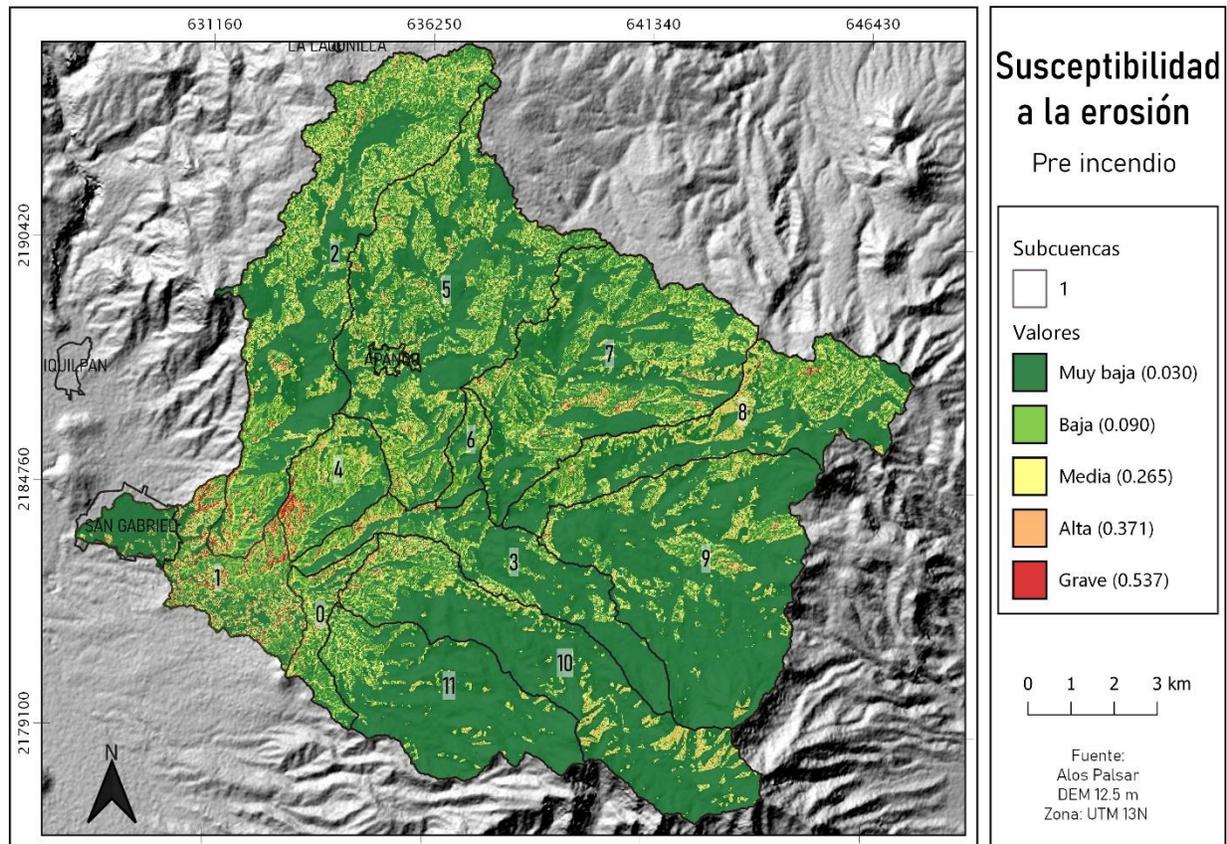


Figura 27: Mapa que muestra la susceptibilidad de erosión en las subcuencas de San Gabriel pre-incendio.

5.6.4 Erosión post-incendios

Para la evaluación de la susceptibilidad a la erosión después de los incendios que afectaron el área de estudio en el mes de mayo del año 2019, se utilizó la misma metodología antes descrita, pero cambiando el valor de C de las zonas afectadas. El resultado se muestra en la figura 28 en donde se puede observar un cambio drástico en las subcuencas que fueron afectadas por los incendios. En particular en las subcuencas 7, 8, 10 y 11 se presenta un incremento en la susceptibilidad de la erosión de alta a grave. En las laderas al sur de la subcuenca 3 el grado de erosión cambia a una susceptibilidad alta (color naranja) y en la subcuenca 9, la susceptibilidad a la erosión más alta se desarrolla en el sector oeste.

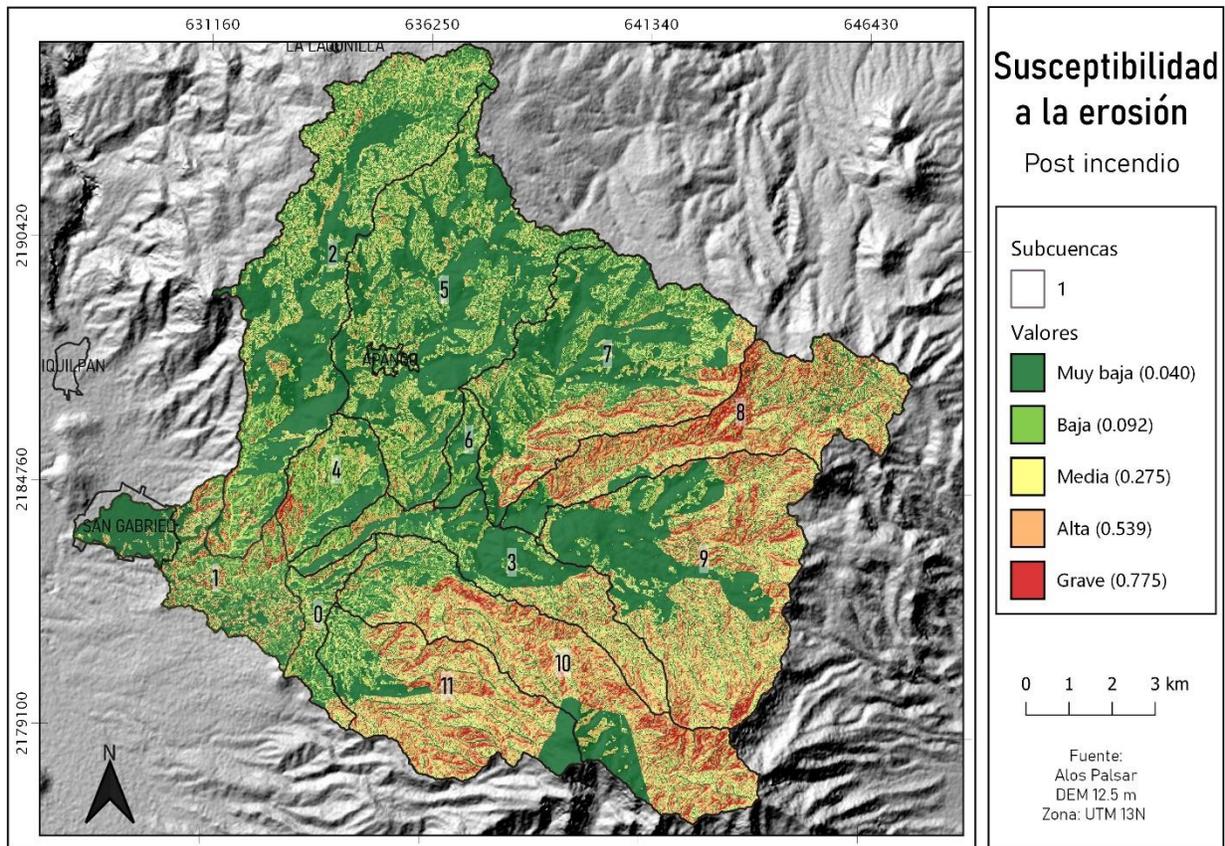


Figura 28: Mapa que muestra la susceptibilidad a la erosión después de los incendios ocurridos en el año 2019, en las subcuencas de San Gabriel.

5.7 Análisis de la precipitación

5.7.1 Lluvias anuales y mensuales: Estación San Gabriel

La estación de San Gabriel tiene un historial de precipitaciones para los años comprendidos entre 1946-1991 (Tabla 11). El año de 1958 corresponde al máximo de la precipitación registrada en un año con un valor de 1160 mm, seguido de los años 1967 y 1963 con una lluvia mayor a los 1000 mm, (Figura 29). Para el periodo analizado, el promedio anual de lluvia es de 691.07 mm, con una desviación estándar de 225.07 mm.

Para representar los resultados se obtuvo la gráfica de probabilidad de excedencia, que representa el porcentaje acumulado vs la precipitación por año (Figura 30), donde se puede observar que la mayoría de los niveles de precipitación se encuentran en un rango de 600 a 900 mm/año, mientras que valores fuera de este rango son menos comunes que sucedan.

Tabla 11: Datos de lluvia históricas ordenados de mayor a menor según su nivel de precipitación en mm por año; n: Número de datos, P_x: probabilidad de excedencia, Pr: periodos de retorno, P_N: probabilidad de ocurrencia.

n	Año	Lluvia (mm)	P _x	Pr	P _N (años)				Distribución Gumbel	
					5	10	25	50	F(x)	X Gumbel
1	1958	1157.50	2.12	47.00	0.10	0.19	0.41	0.65	0.97	1340.77
2	1967	1086.30	4.25	23.50	0.19	0.35	0.66	0.88	0.95	1202.55
3	1963	1077.60	6.38	15.66	0.28	0.48	0.80	0.96	0.93	1120.76
4	1976	992.90	8.51	11.70	0.35	0.58	0.89	0.98	0.91	1062.06
5	1973	968.50	10.63	9.40	0.43	0.67	0.94	0.99	0.89	1015.98
6	1948	903.00	12.76	7.83	0.49	0.74	0.96	0.99	0.87	977.87
7	1955	874.20	14.89	6.71	0.55	0.80	0.98	1.00	0.85	945.25
8	1985	872.90	17.02	5.87	0.60	0.84	0.99	1.00	0.83	916.62
9	1983	840.10	19.14	5.22	0.65	0.88	0.99	1.00	0.80	891.03
10	1947	825.60	21.27	4.70	0.69	0.90	0.99	1.00	0.78	867.83
11	1965	813.10	23.40	4.27	0.73	0.93	0.99	1.00	0.76	846.54
12	1959	783.00	25.53	3.91	0.77	0.94	0.99	1.00	0.74	826.82
13	1982	782.10	27.66	3.61	0.80	0.96	1.00	1.00	0.72	808.41
14	1966	758.80	29.78	3.35	0.82	0.97	1.00	1.00	0.70	791.10
15	1969	753.10	31.91	3.13	0.85	0.97	1.00	1.00	0.68	774.72
16	1970	747.00	34.04	2.93	0.87	0.98	1.00	1.00	0.66	759.14
17	1987	740.50	36.17	2.76	0.89	0.98	1.00	1.00	0.63	744.25
18	1968	736.50	38.29	2.61	0.91	0.99	1.00	1.00	0.61	729.96
19	1990	731.30	40.42	2.47	0.92	0.99	1.00	1.00	0.59	716.19
20	1988	727.80	42.55	2.35	0.93	0.99	1.00	1.00	0.57	702.86
21	1981	726.00	44.68	2.23	0.94	0.99	1.00	1.00	0.55	689.93
22	1984	711.70	46.80	2.13	0.95	0.99	1.00	1.00	0.53	677.34
23	1980	708.40	48.93	2.04	0.96	0.99	1.00	1.00	0.51	665.04
24	1986	702.70	51.06	1.95	0.97	0.99	1.00	1.00	0.48	652.99
25	1977	701.10	53.19	1.88	0.97	0.99	1.00	1.00	0.46	641.14
26	1960	684.00	55.31	1.80	0.98	1.00	1.00	1.00	0.44	629.46
27	1971	684.00	57.44	1.74	0.98	1.00	1.00	1.00	0.42	617.92
28	1946	681.90	59.57	1.67	0.98	1.00	1.00	1.00	0.40	606.48
29	1954	677.80	61.70	1.62	0.99	1.00	1.00	1.00	0.38	595.09
30	1961	668.00	63.83	1.56	0.99	1.00	1.00	1.00	0.36	583.74
31	1972	662.80	65.95	1.51	0.99	1.00	1.00	1.00	0.34	572.37
32	1956	658.80	68.08	1.46	0.99	1.00	1.00	1.00	0.31	560.95
33	1978	648.10	70.21	1.42	0.99	1.00	1.00	1.00	0.29	549.43
34	1952	640.30	72.34	1.38	0.99	1.00	1.00	1.00	0.27	537.77
35	1974	639.00	74.46	1.34	0.99	1.00	1.00	1.00	0.25	525.91
36	1964	609.90	76.59	1.30	0.99	1.00	1.00	1.00	0.23	513.78
37	1951	609.60	78.72	1.27	1.00	1.00	1.00	1.00	0.21	501.31
38	1975	561.90	80.85	1.23	1.00	1.00	1.00	1.00	0.19	488.38
39	1962	556.00	82.97	1.20	1.00	1.00	1.00	1.00	0.17	474.86
40	1953	546.30	85.10	1.17	1.00	1.00	1.00	1.00	0.14	460.59

41	1989	493.90	87.23	1.14	1.00	1.00	1.00	1.00	0.12	445.31
42	1957	451.00	89.36	1.11	1.00	1.00	1.00	1.00	0.10	428.65
43	1949	255.60	91.48	1.09	1.00	1.00	1.00	1.00	0.08	410.01
44	1991	213.80	93.61	1.06	1.00	1.00	1.00	1.00	0.06	388.33
45	1979	65.10	95.74	1.04	1.00	1.00	1.00	1.00	0.04	361.35
46	1950	59.50	97.87	1.02	1.00	1.00	1.00	1.00	0.02	322.38

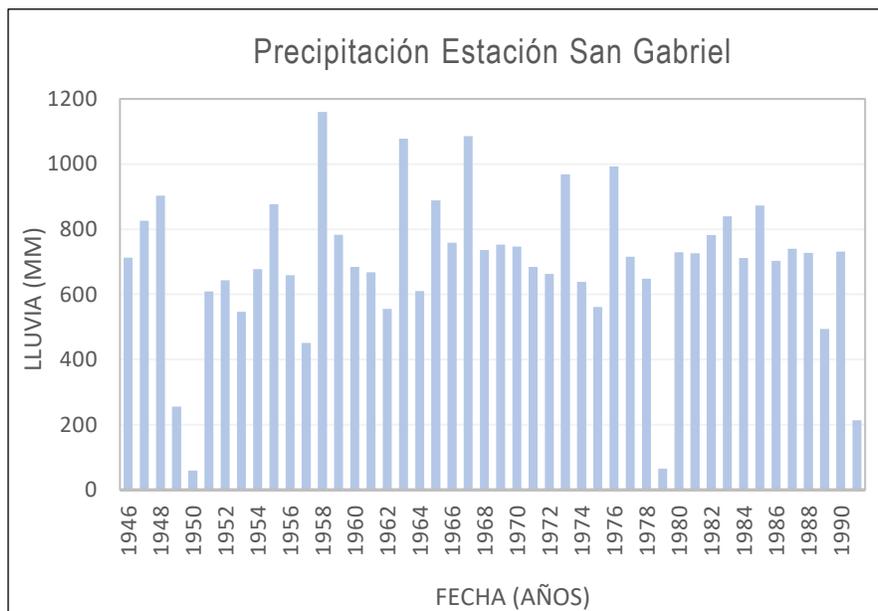


Figura 29: Histograma de precipitaciones para 46 años (1946-1991), para la estación de San Gabriel.

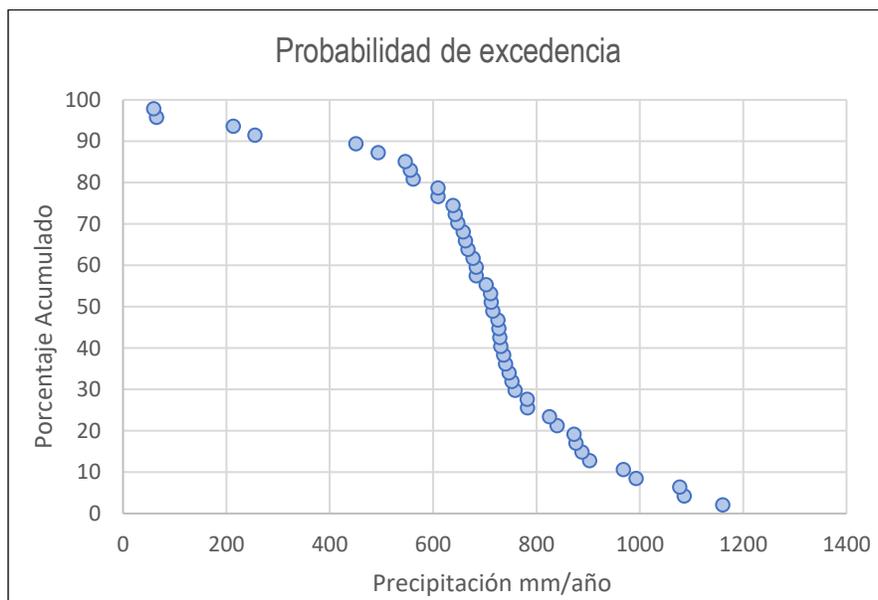


Figura 30: Gráfica del porcentaje acumulado vs la precipitación en mm por año, usando la probabilidad de excedencia (P_x) de Weibull.

Para calcular el periodo de retorno P_r se aplicó la ecuación [2], dando como resultado la gráfica que muestra el nivel de precipitación en mm que se espera tener en un periodo de 50 años, (Figura 31). En la Figura 32 se muestra la gráfica de probabilidades de ocurrencia calculadas para 1, 5, 10, 25 y 50 años en donde se puede observar que en lluvias de 600 mm tienen el 80% de probabilidad de presentarse cada año, y el 100% de probabilidad en un periodo de 5 años en adelante. Lluvias anuales mayores a los 1000 mm tienen una probabilidad menor al 10% de ocurrir cada año, pero más del 50% a partir de los 10 años.

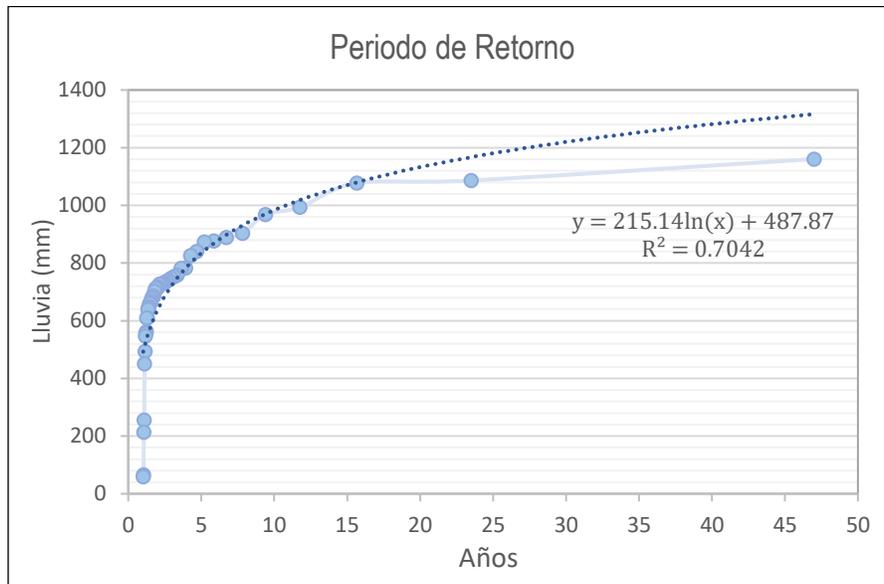


Figura 31: Gráfica que muestra el nivel de precipitación en mm, para un periodo de retorno de 50 años.

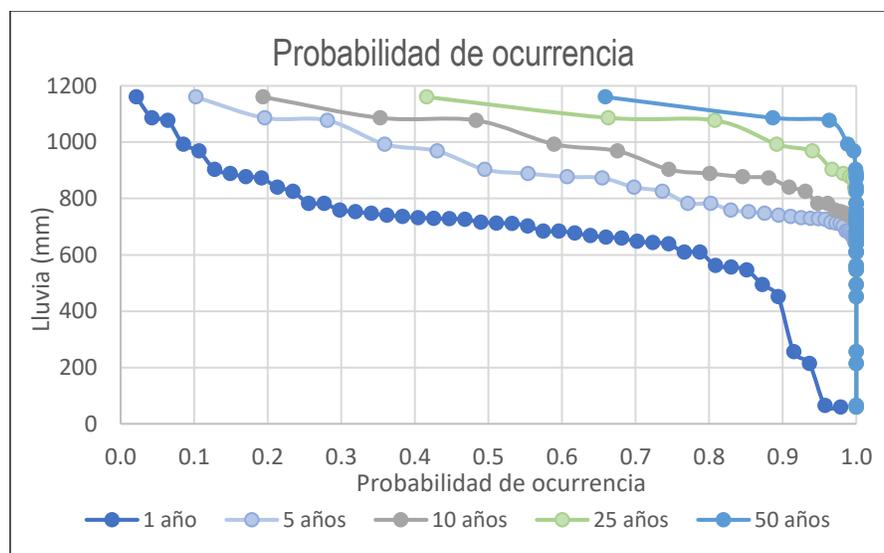


Figura 32: Gráfica de la probabilidad de ocurrencia para 1, 5, 10, 25 y 50 años.

La figura 33 corresponde a la distribución de Gumbel de los datos de lluvia anuales en la estación San Gabriel. A partir de la ecuación [19] se obtuvieron valores de lluvia para diferentes periodos de retorno, por ejemplo, con un intervalo de 5 años la lluvia esperada sería de 881 mm, mientras lluvias mayores de 1000 mm se presentarán en periodos de retorno de 10 años (Tabla 12).

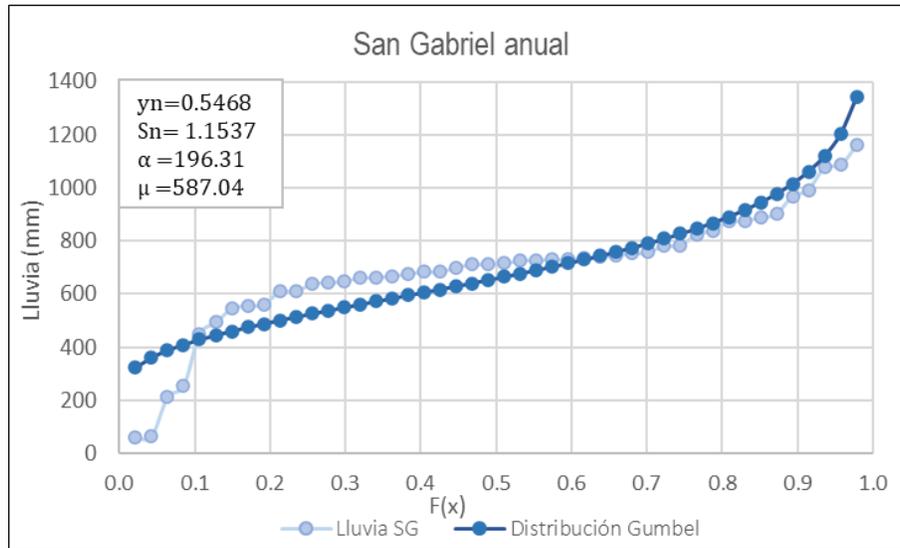


Figura 33: Precipitación anual en mm, a partir de la distribución de Gumbel.

Tabla 12: Nivel de lluvia anual esperada (mm) para diferentes periodos de retorno: 5, 10, 15 y 20 años; F(x): Probabilidad de que ocurra.

Periodos de Retorno Anual SG		
Años	F(x)	Lluvia (mm)
5	0.80	881.50
10	0.90	1028.82
15	0.93	1111.93
20	0.95	1170.13

En cuanto a la precipitación mensual, el mes donde se tiene mayor cantidad de precipitación es en julio de los años 1976 y 1974 con 321 mm y 302 mm respectivamente (Tabla 13). El mes de octubre del año 1950 y febrero de 1979 son los meses con menor nivel de precipitación con 30 mm.

La gráfica de la figura 34 muestra la distribución de Gumbel de los máximos mensuales en donde se observa un buen ajuste en la variabilidad de los datos. En cuanto a la lluvia mensual por cada periodo de retorno, se obtuvo que las lluvias de 236 mm se presentan en un periodo de 5 años, y 271 mm para los 10 años, lo que representa una variabilidad mínima. Lluvias mayores a los 300 mm tienen un periodo de retorno de 20 años (Tabla 14).

Tabla 13: Lluvia mensual en mm, ordenada de mayor a menor, con la distribución de Gumbel; Px: probabilidad de excedencia.

Máxima Mensual SG						
n	Año	Mes	Lluvia (mm)	Px	F(x)	Gumbel
1	1976	julio	321.00	0.02	0.98	346.92
2	1974	julio	302.00	0.04	0.96	313.65
3	1960	julio	283.00	0.06	0.94	293.96
4	1985	junio	271.60	0.09	0.91	279.83
5	1973	septiembre	266.50	0.11	0.89	268.73
6	1968	julio	248.50	0.13	0.87	259.56
7	1948	septiembre	245.10	0.15	0.85	251.71
8	1958	junio	224.40	0.17	0.83	244.81
9	1977	julio	222.60	0.19	0.81	238.65
10	1967	septiembre	219.50	0.21	0.79	233.07
11	1965	agosto	219.00	0.23	0.77	227.94
12	1955	julio	217.60	0.26	0.74	223.20
13	1991	junio	213.80	0.28	0.72	218.76
14	1982	julio	212.70	0.30	0.70	214.60
15	1971	septiembre	210.50	0.32	0.68	210.65
16	1956	agosto	205.90	0.34	0.66	206.90
17	1969	octubre	201.50	0.36	0.64	203.32
18	1981	julio	201.00	0.38	0.62	199.88
19	1947	agosto	198.10	0.40	0.60	196.56
20	1963	agosto	195.80	0.43	0.57	193.35
21	1987	julio	193.50	0.45	0.55	190.24
22	1952	junio	192.00	0.47	0.53	187.21
23	1970	julio	190.50	0.49	0.51	184.25
24	1983	julio	188.00	0.51	0.49	181.35
25	1984	julio	187.80	0.53	0.47	178.50
26	1946	junio	186.90	0.55	0.45	175.68
27	1959	octubre	185.00	0.57	0.43	172.91
28	1986	septiembre	184.50	0.60	0.40	170.15
29	1988	septiembre	183.30	0.62	0.38	167.41
30	1951	julio	176.80	0.64	0.36	164.68
31	1972	septiembre	176.00	0.66	0.34	161.94
32	1975	julio	175.90	0.68	0.32	159.19
33	1954	julio	171.20	0.70	0.30	156.42
34	1990	julio	167.20	0.72	0.28	153.61
35	1966	septiembre	166.30	0.74	0.26	150.76
36	1953	julio	161.10	0.77	0.23	147.84
37	1978	agosto	155.00	0.79	0.21	144.83
38	1964	junio	154.00	0.81	0.19	141.72
39	1949	julio	152.20	0.83	0.17	138.47
40	1961	julio	151.50	0.85	0.15	135.03

41	1962	septiembre	145.00	0.87	0.13	131.35
42	1980	enero	142.10	0.89	0.11	127.34
43	1957	agosto	140.50	0.91	0.09	122.85
44	1989	julio	135.10	0.94	0.06	117.63
45	1950	octubre	31.50	0.96	0.04	111.14
46	1979	febrero	27.50	0.98	0.02	101.76

Tabla 14: Precipitación mensual esperada para diferentes periodos de retorno (5, 10, 15 y 20 años), a partir de la ecuación de Gumbel.

Periodos de Retorno Mensual SG		
Años	F(x)	Lluvia (mm)
5	0.80	236.36
10	0.90	271.82
15	0.93	291.84
20	0.95	305.85

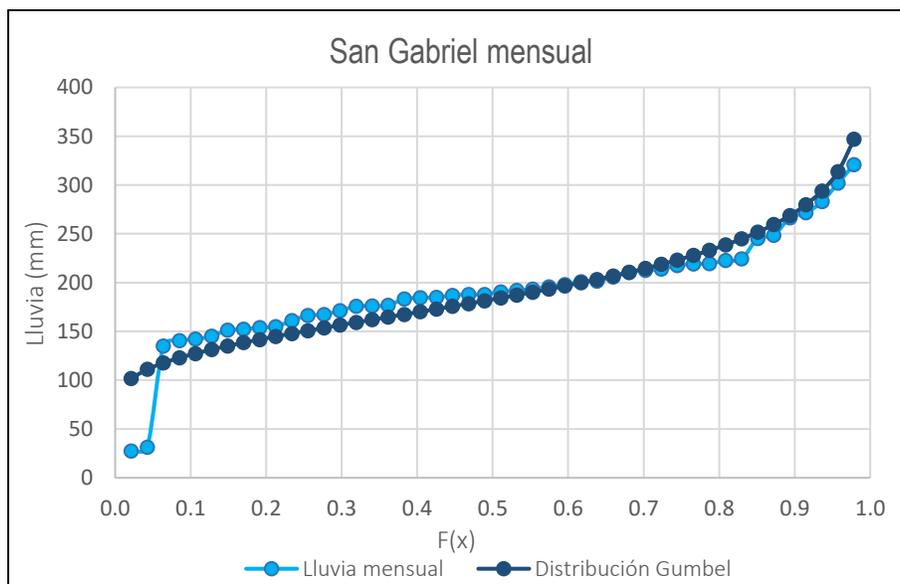


Figura 34: Precipitación mensual en mm, mostrando el ajuste de acuerdo a la distribución de Gumbel.

5.7.2 Máximos diarios

Para poder analizar un análisis de peligro a inundación en la cuenca San Gabriel, es necesario definir los periodos de retorno de eventos extraordinarios. Para ello se requiere hacer un análisis por valores diarios de la lluvia. Para el presente trabajo se definieron periodos de retorno con la lluvia máxima acumulada en un solo día, y en un lapso de 3 a 5 días, intervalo de tiempo que normalmente se consideran para la evaluación de eventos extremos. La figura 35 representa el máximo diario de todos los años analizados

(1946-1991), donde el valor máximo es de 96 mm en 1967, continuando con el año de 1969 con 95 mm. La distribución de la lluvia máxima acumulada diaria muestra valores promedio de 52.6 mm.

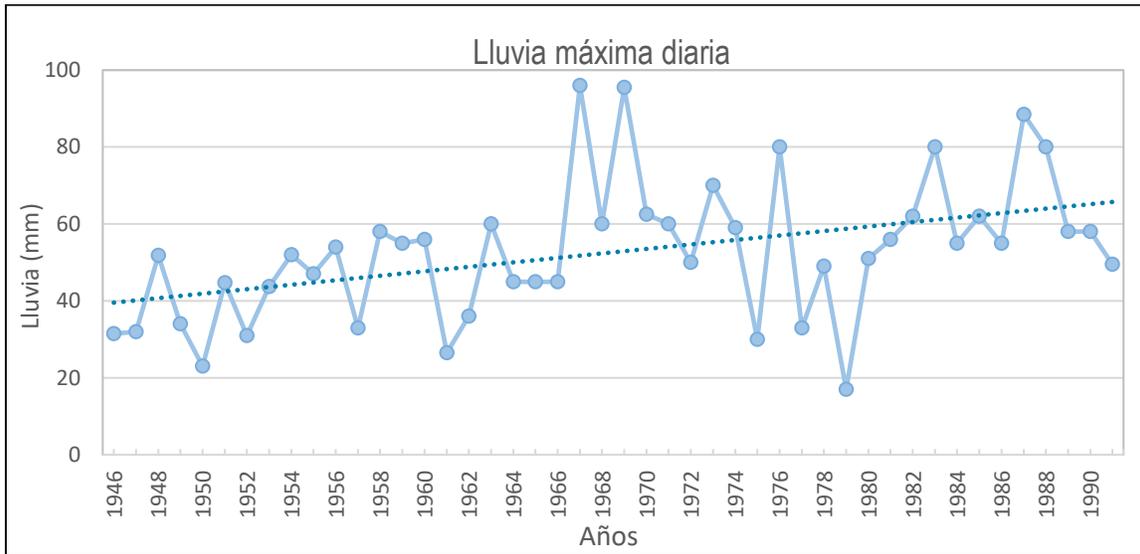


Figura 35: Lluvia máxima en 1 día, en los años 1946-1991.

De esta distribución se obtuvieron las curvas de Gumbel (Figura 36) para poder definir los valores extremos para diferentes tiempos de retorno. Para un periodo de retorno de 5 años, el nivel de lluvia esperada es de 67.53 mm, para los 10 años una lluvia de 79.25 mm. Para periodos de retorno más amplios (20 años) la lluvia esperada diaria es de 90.5 mm, (Tabla 15).

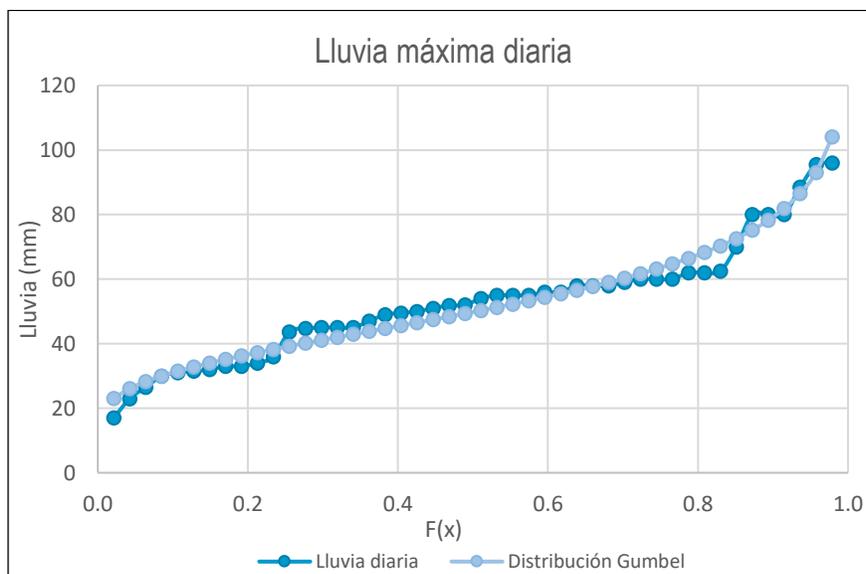


Figura 36: Precipitación máxima diaria en mm, mostrando su ajuste a partir de la distribución de Gumbel.

Tabla 15: Nivel de lluvia diaria para diferentes periodos de retorno (5, 10, 15 y 20 años).

Periodos de Retorno diario SG		
Años	F(x)	Lluvia (mm)
5	0.80	67.53
10	0.90	79.25
15	0.93	85.86
20	0.95	90.49

5.7.3 Lluvias de 3-5 días

Del historial de precipitación se seleccionó un lapso de días continuos (3-5 días), de máxima acumulación de lluvia (Tabla 16), para posteriormente obtener la distribución de Gumbel y la lluvia esperada para diferentes periodos de retorno.

Tabla 16: Lluvia en mm acumulada de 3-5 días, ordenadas de mayor a menor, con su distribución de Gumbel.

N	año	Lluvia (mm)	F(x)	X Gumbel	n	año	Lluvia (mm)	F(x)	X Gumbel
1	1973	142.00	0.97	168.86	24	1976	86.50	0.48	78.60
2	1985	140.00	0.95	150.72	25	1988	80.30	0.46	77.04
3	1980	137.50	0.93	139.99	26	1983	80.00	0.44	75.51
4	1971	135.00	0.91	132.28	27	1978	76.40	0.42	74.00
5	1974	128.50	0.89	126.24	28	1975	76.00	0.40	72.49
6	1951	122.30	0.87	121.24	29	1955	75.00	0.38	71.00
7	1968	117.50	0.85	116.95	30	1972	74.50	0.36	69.51
8	1958	111.00	0.82	113.20	31	1981	73.00	0.34	68.02
9	1966	106.50	0.80	109.84	32	1989	72.00	0.31	66.52
10	1948	102.50	0.78	106.79	33	1967	70.50	0.29	65.01
11	1959	99.00	0.76	104.00	34	1977	68.60	0.27	63.48
12	1969	98.00	0.74	101.41	35	1970	66.00	0.25	61.92
13	1987	97.00	0.72	99.00	36	1963	65.00	0.23	60.33
14	1956	96.70	0.70	96.72	37	1946	61.00	0.21	58.69
15	1960	96.00	0.68	94.57	38	1952	56.50	0.19	56.99
16	1982	96.00	0.65	92.53	39	1953	55.70	0.17	55.22
17	1986	94.50	0.63	90.58	40	1961	52.00	0.14	53.35
18	1964	94.00	0.61	88.70	41	1962	52.00	0.12	51.34
19	1965	92.00	0.59	86.89	42	1954	46.00	0.10	49.16
20	1991	92.00	0.57	85.14	43	1949	42.60	0.08	46.71
21	1984	89.50	0.55	83.45	44	1957	37.50	0.06	43.86
22	1990	89.00	0.53	81.79	45	1979	17.00	0.04	40.32
23	1947	88.50	0.51	80.18	46	1950	16.50	0.02	35.21

La figura 37 muestra la lluvia máxima acumulada en este periodo de tiempo, años como 1973 y 1985 tuvieron un total acumulado de 140 mm, a diferencia de años como 1950 y 1979 donde la lluvia acumulada fue de 17 mm y 16.5 mm respectivamente. El promedio de los datos es de 84 mm y la desviación estándar presenta un valor de 29.7 mm. De esta distribución de los datos se obtuvieron las curvas de Gumbel (Figura 38). Se calcula que lluvias con un nivel de 108.5 mm se presentarán en un periodo de retorno de 5 años, para los 10 años esta lluvia es de 127 mm, y para periodos de retorno mayores, como 20 años, la precipitación que se espera tener es de 146.4 mm (Tabla 17).

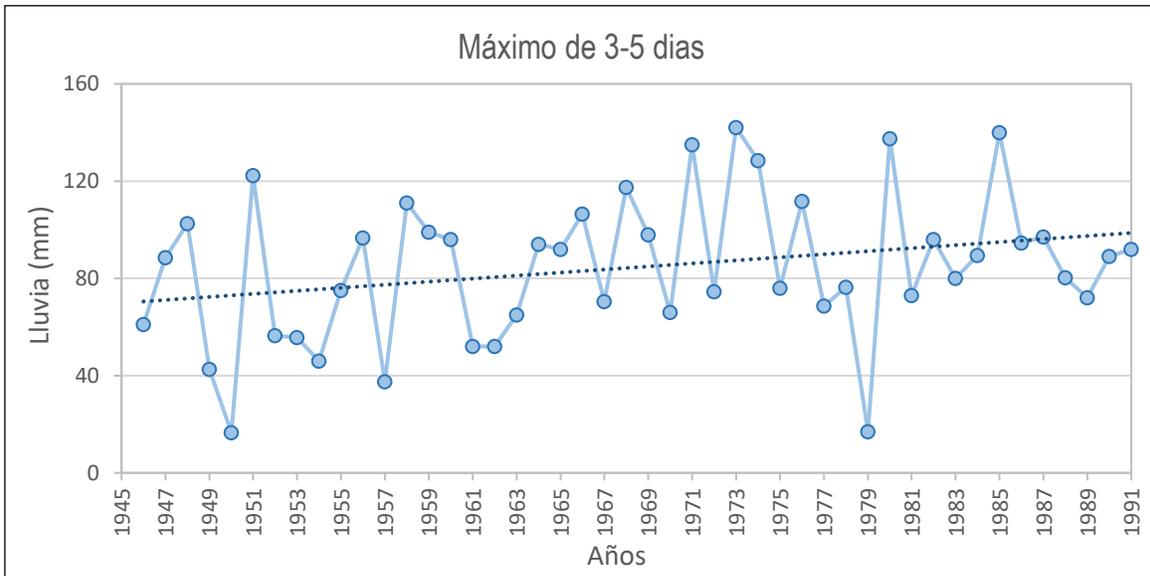


Figura 37: Gráfica de la precipitación acumulada de 3-5 días, por año.

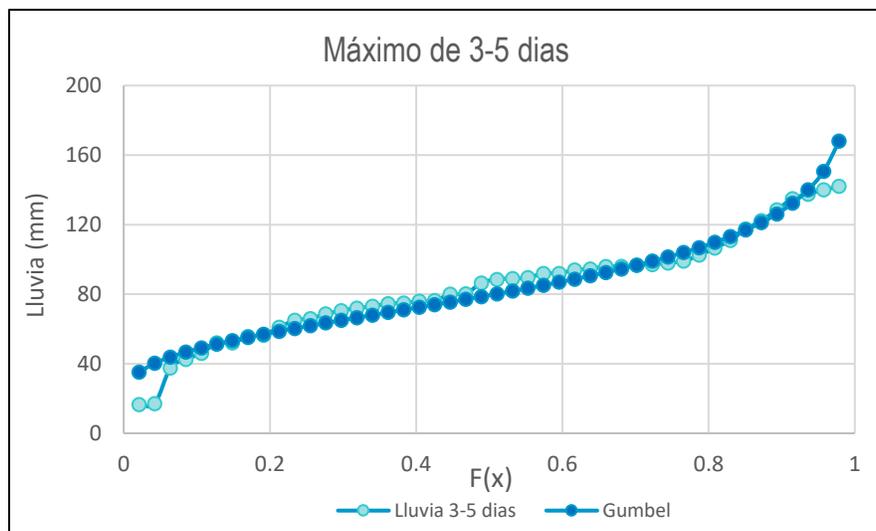


Figura 38: Distribución de Gumbel para la precipitación máxima acumulada en un intervalo de 3-5 días.

Tabla 17: Nivel de lluvia esperada en mm para los periodos de retorno de 5, 10, 15 y 20 años.

Periodos de retorno (3-5 días)		
Años	Y_T	Lluvia (mm)
5	1.499	108.59
10	2.25	127.92
15	2.67	138.83
20	2.97	146.47

5.7.4 Lluvia del evento: 2 de junio de 2019

Debido a la escasa densidad de pluviómetros y a su funcionamiento intermitente, resulta complicado estimar la variabilidad espacial-temporal de las precipitaciones en las zonas de interés (Rahmawati y Lubczynski 2018). Esto sucede en la cuenca San Gabriel, donde la estación meteorológica tiene datos hasta el año 1991, por lo que los datos del nivel de lluvia para el día del evento se obtuvieron de información satelital de ClimateSERV con una resolución de 5.5 km. En la figura 39 se puede observar la lluvia diaria para el mes de junio del año 2019, donde la máxima precipitación corresponde al 2 de junio con 32 mm, día del evento, seguido del 27 de junio con 27 mm, mientras que el día 18 y 25 de junio tienen una precipitación de 3.5 mm y 3.8 mm respectivamente.

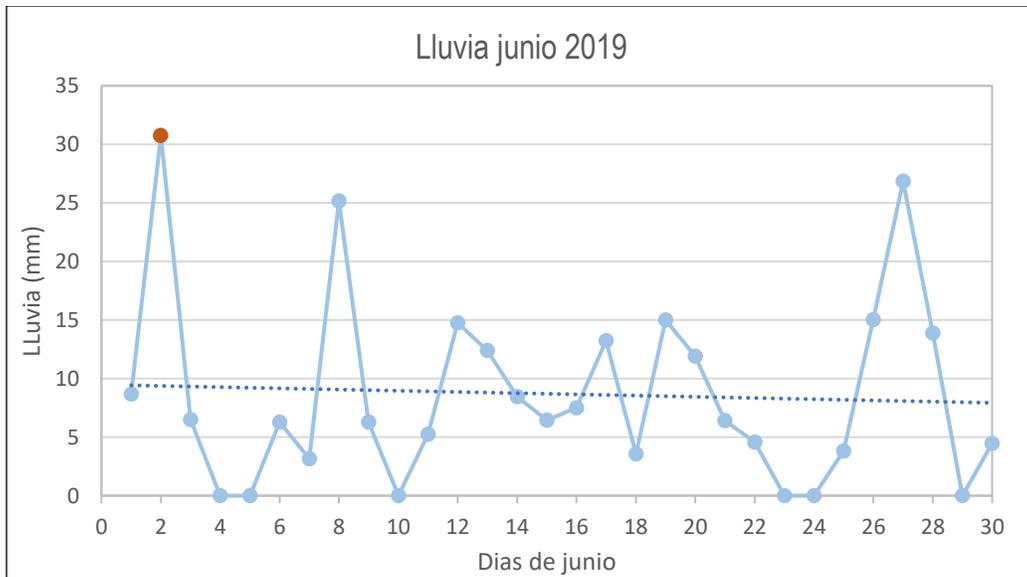


Figura 39: Lluvia registrada en el mes de junio de 2019, datos de radar ClimateSERV. Resaltando el nivel de lluvia correspondiente al día del evento (2 de junio de 2019).

5.7.5 Estación: Ciudad Guzmán

Para esta estación se realizó un histograma del historial de precipitación, la cual comprende información para los años 1926-2018 (Figura 40), siendo el año de 1992 el que mayor acumulación de lluvia presenta con 1163.8 mm, seguido de los años 2018 y 1993 con 1069.7 mm y 974.1 mm respectivamente.

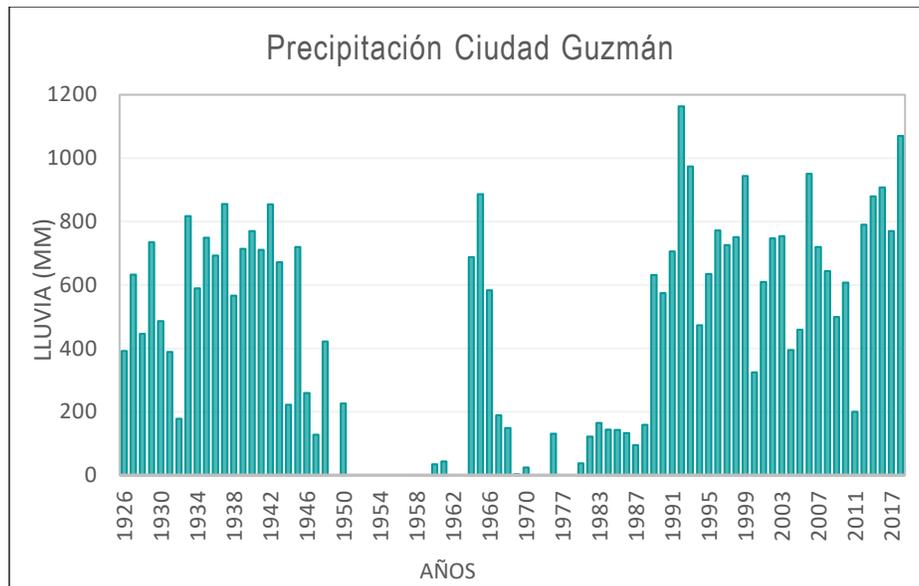


Figura 40: Histograma del historial de lluvia (1926-2018) para la estación de Ciudad Guzmán.

Como se muestra en la figura 39, en la estación existen diversos años en donde la precipitación es de cero mm, por lo que se tomó de todo el historial, un segmento de datos que fueran continuos (36 años), comprendiendo entre los años 1981 a 2018. Este período de tiempo es el que se usará para obtener la información de períodos de excedencia, períodos de retorno mediante Gumbel, probabilidad de ocurrencia y parámetros estadísticos (Tabla 18).

Tabla 18: Datos de lluvia por año, ordenadas de mayor a menor para la estación de Ciudad Guzmán (1981-2018); n= Número de datos, Px: probabilidad de excedencia, Pr: período de retorno, P_N: probabilidad de ocurrencia.

n	Año	Lluvia (mm)	Px	Pr	P _N (años)				Distribución Gumbel	
					5	10	25	50	F _x	X Gumbel
1	1992	1163.80	2.70	37.00	0.12	0.24	0.49	0.74	0.97	1482.16
2	2018	1069.70	5.40	18.50	0.24	0.42	0.75	0.93	0.94	1272.10
3	1993	974.10	8.10	12.33	0.34	0.57	0.87	0.98	0.91	1147.39
4	2006	950.70	10.81	9.25	0.43	0.68	0.94	0.99	0.89	1057.57
5	1999	944.00	13.51	7.40	0.51	0.76	0.97	0.99	0.86	986.81
6	2016	908.00	16.21	6.16	0.58	0.83	0.98	1.00	0.83	928.06
7	2015	879.70	18.91	5.28	0.65	0.87	0.99	1.00	0.81	877.56
8	2013	790.20	21.62	4.62	0.70	0.91	0.99	1.00	0.78	833.04

9	1996	771.90	24.32	4.11	0.75	0.93	0.99	1.00	0.75	793.07
10	2017	769.70	27.02	3.70	0.79	0.95	1.00	1.00	0.73	756.63
11	2003	754.40	29.73	3.36	0.82	0.97	1.00	1.00	0.70	723.03
12	1998	750.70	32.43	3.08	0.85	0.98	1.00	1.00	0.67	691.71
13	2002	746.60	35.13	2.84	0.88	0.98	1.00	1.00	0.64	662.29
14	1997	725.70	37.83	2.64	0.90	0.99	1.00	1.00	0.62	634.43
15	2007	720.40	40.54	2.46	0.92	0.99	1.00	1.00	0.59	607.88
16	1991	705.40	43.24	2.31	0.94	0.99	1.00	1.00	0.56	582.42
17	2008	643.80	45.94	2.17	0.95	0.99	1.00	1.00	0.54	557.87
18	1995	634.60	48.64	2.05	0.96	0.99	1.00	1.00	0.51	534.08
19	1989	631.50	51.35	1.94	0.97	0.99	1.00	1.00	0.48	510.91
20	2001	609.70	54.05	1.85	0.98	1.00	1.00	1.00	0.45	488.23
21	2010	607.60	56.75	1.76	0.98	1.00	1.00	1.00	0.43	465.93
22	1990	574.90	59.45	1.68	0.98	1.00	1.00	1.00	0.40	443.90
23	2009	499.20	62.16	1.60	0.99	1.00	1.00	1.00	0.37	422.03
24	1994	472.60	64.86	1.54	0.99	1.00	1.00	1.00	0.35	400.19
25	2005	458.60	67.56	1.48	0.99	1.00	1.00	1.00	0.32	378.29
26	2004	395.10	70.27	1.42	0.99	1.00	1.00	1.00	0.29	356.18
27	2000	324.10	72.97	1.37	0.99	1.00	1.00	1.00	0.27	333.71
28	2011	199.60	75.67	1.32	0.99	1.00	1.00	1.00	0.24	310.70
29	1983	165.20	78.37	1.27	1.00	1.00	1.00	1.00	0.21	286.93
30	1988	158.60	81.08	1.23	1.00	1.00	1.00	1.00	0.18	262.09
31	1984	143.40	83.78	1.19	1.00	1.00	1.00	1.00	0.16	235.79
32	1985	142.90	86.48	1.15	1.00	1.00	1.00	1.00	0.13	207.42
33	1986	133.30	89.18	1.12	1.00	1.00	1.00	1.00	0.10	176.02
34	1982	122.00	91.89	1.08	1.00	1.00	1.00	1.00	0.08	139.89
35	1987	94.70	94.59	1.05	1.00	1.00	1.00	1.00	0.05	95.44
36	1981	37.60	97.29	1.02	1.00	1.00	1.00	1.00	0.02	32.13

La figura 41 muestra el histograma de la precipitación para los años de 1981 a 2018, siendo el año 1992 el de mayor lluvia con 1136.8 mm, después el año 2018 con lluvia registrada de 1069.7 mm, los años de 1987 y 1981 corresponde a aquellos que registran la menor precipitación con 94.7 mm y 37.6 mm respectivamente (posiblemente valores asociados a un mal funcionamiento de la estación). El promedio de precipitación para este intervalo de tiempo es de 574.27 mm, y la desviación estándar presenta un valor de 312.68 mm.

Con respecto a la figura 42 se puede observar que la mayoría de los niveles de precipitación se encuentran en un rango de 500 a 800 mm/año, mientras que valores fuera de este rango son menos comunes a que se presenten. En la figura 43 se puede observar que un nivel de lluvia de 1163 mm como el ocurrido en el año 1992, se puede presentar en un periodo de retorno de 40 años.

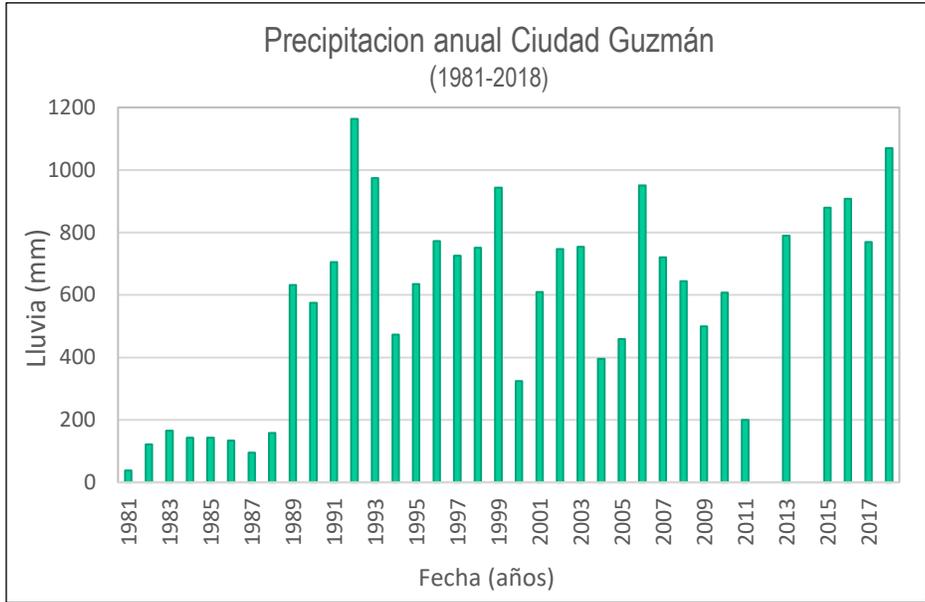


Figura 41: Historial de lluvia, para los años 1981 a 2018.

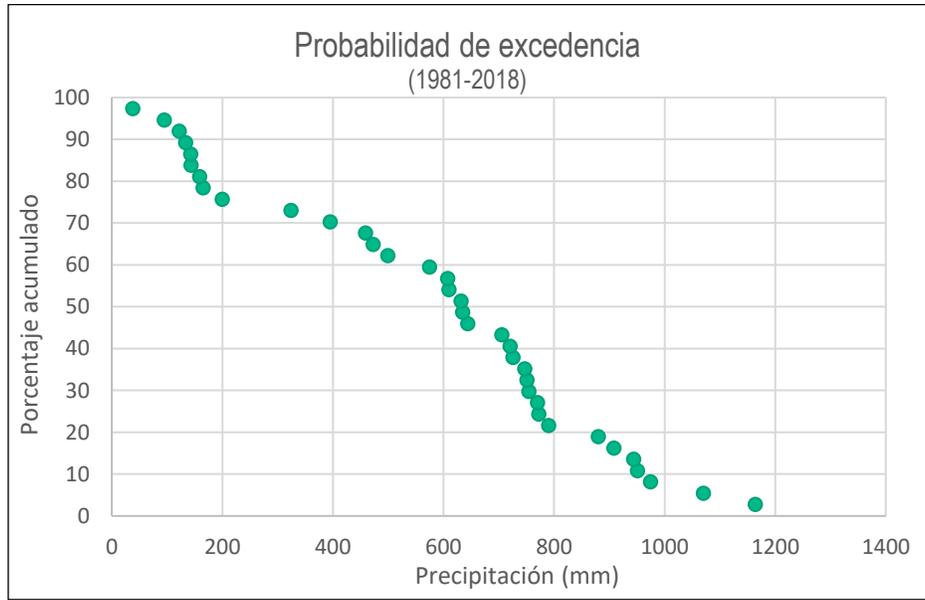


Figura 42: Gráfica que muestra el porcentaje acumulado con respecto al nivel de lluvia en m, por año.

En la figura 44 se muestra la gráfica de probabilidades de ocurrencia calculadas para 1, 5, 10, 25 y 50 años. Donde se puede observar que en niveles de lluvia de 600 mm se distribuye mejor las probabilidades de ocurrencia.

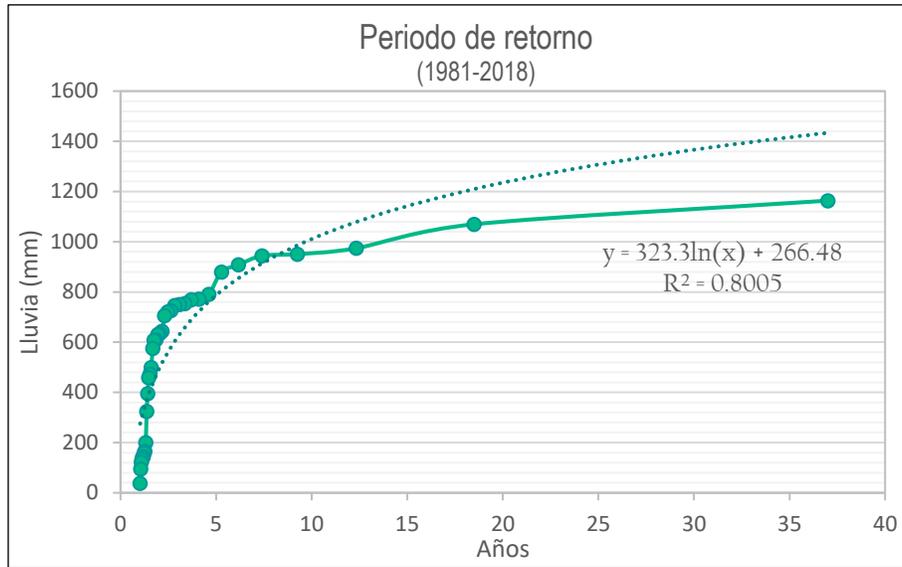


Figura 43: Gráfica que muestra la precipitación en mm para un periodo de retorno de 40 años.

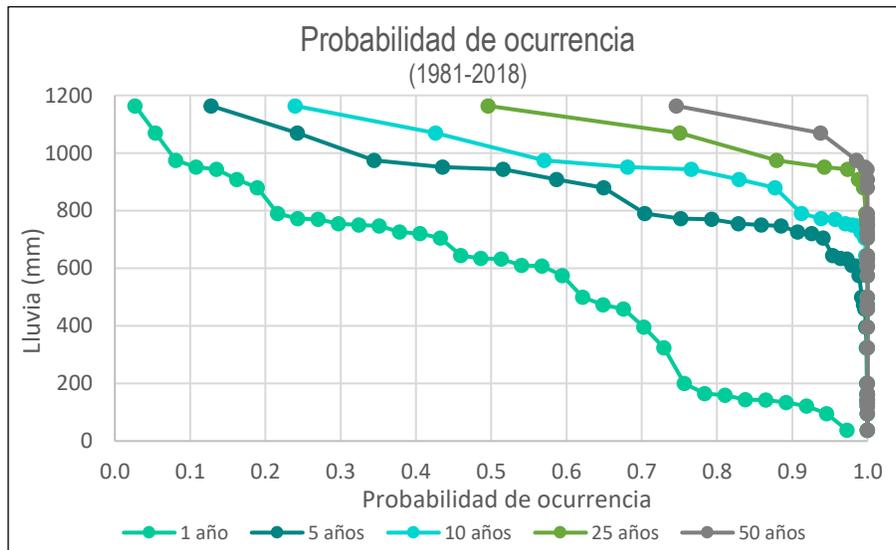


Figura 44: Gráfica de la probabilidad de ocurrencia para 1, 5, 10, 25 y 50 años.

El ajuste de los datos de lluvia anuales para la estación Ciudad Guzmán por medio de la distribución de Gumbel se observa en la figura 45. En la tabla 19 se muestran los valores de lluvia para diferentes periodos de retorno, lluvias de 860 mm se espera que se presenten en periodos de cinco años, mientras lluvias mayores de 1000 mm, se presentaran en periodos de 10 años.

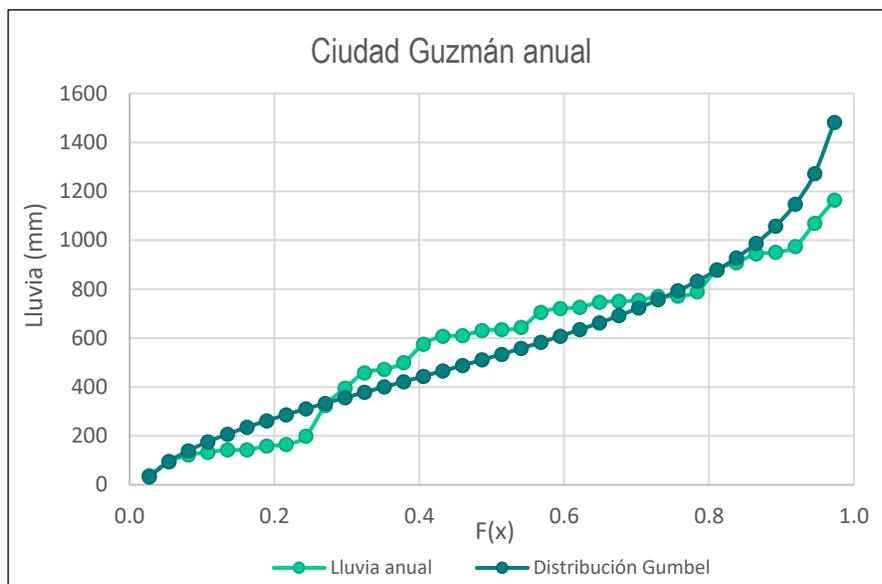


Figura 45: Ajuste a partir de la distribución de Gumbel, para la precipitación anual en mm.

Tabla 19: Nivel de lluvia anual esperada para diferentes periodos de retorno (5, 10, 15 y 20 años).

Periodos de Retorno Anual CG		
Años	F(x)	Lluvia (mm)
5	0.80	859.13
10	0.90	1082.05
15	0.93	1207.83
20	0.96	1363.72

De acuerdo al análisis de la precipitación mensual, el mes en donde se registró una mayor cantidad de precipitación fue en enero de 1992 con 420.2 mm y en agosto de 1995 con 290.9 mm, (Tabla 20). La gráfica de la figura 46, muestra las lluvias máximas mensuales con su respectiva distribución de Gumbel, en donde se observa un buen ajuste representativo en la variabilidad de los datos.

Para los periodos de retorno de precipitaciones mensuales, se calcula que lluvias de 248 mm se presenten en un periodo de 5 años, para los 10 años, la precipitación es de 309 mm, para lluvias con niveles de 367 mm el periodo de retorno es de 20 años, (Tabla 21).

Tabla 20: Lluvia mensual en mm, ordenadas de mayor a menor, con su respectiva distribución de Gumbel.

Máxima Mensual CG (1981-2018)						
n	Año	Mes	Lluvia (mm)	Px	Fx	Gumbel
1	1992	enero	420.20	0.02	0.97	418.60
2	1995	agosto	290.90	0.05	0.94	361.11
3	1999	julio	284.50	0.08	0.91	326.98
4	2013	septiembre	277.10	0.10	0.89	302.39
5	1993	junio	263.40	0.13	0.86	283.03
6	2003	septiembre	249.70	0.16	0.83	266.95
7	2016	julio	249.30	0.18	0.81	253.12
8	2015	octubre	245.20	0.21	0.78	240.94
9	1989	julio	226.40	0.24	0.75	230.00
10	1998	septiembre	219.90	0.27	0.72	220.03
11	2017	agosto	216.90	0.29	0.70	210.83
12	2006	septiembre	206.80	0.32	0.67	202.26
13	2010	septiembre	200.70	0.35	0.64	194.21
14	2011	junio	199.60	0.37	0.62	186.58
15	2018	septiembre	199.30	0.40	0.59	179.31
16	2004	septiembre	196.20	0.43	0.56	172.35
17	1996	agosto	195.20	0.45	0.54	165.63
18	2007	agosto	194.10	0.48	0.51	159.12
19	2001	julio	178.60	0.51	0.48	152.78
20	1991	julio	174.40	0.54	0.45	146.57
21	2008	junio	164.50	0.56	0.43	140.47
22	2005	septiembre	157.90	0.59	0.40	134.44
23	2009	agosto	152.10	0.62	0.37	128.45
24	1994	agosto	150.60	0.64	0.35	122.47
25	1997	julio	138.70	0.67	0.32	116.48
26	1990	septiembre	134.40	0.70	0.29	110.43
27	2002	junio	132.50	0.73	0.27	104.28
28	2000	junio	125.60	0.75	0.24	97.98
29	1983	julio	47.90	0.78	0.21	91.47
30	1988	julio	45.50	0.81	0.18	84.68
31	1985	agosto	44.90	0.83	0.16	77.48
32	1984	julio	34.70	0.86	0.13	69.71
33	1986	julio	34.60	0.89	0.10	61.12
34	1982	julio	32.90	0.91	0.08	51.23
35	1987	julio	28.10	0.94	0.05	39.06
36	1981	septiembre	11.10	0.97	0.02	21.74

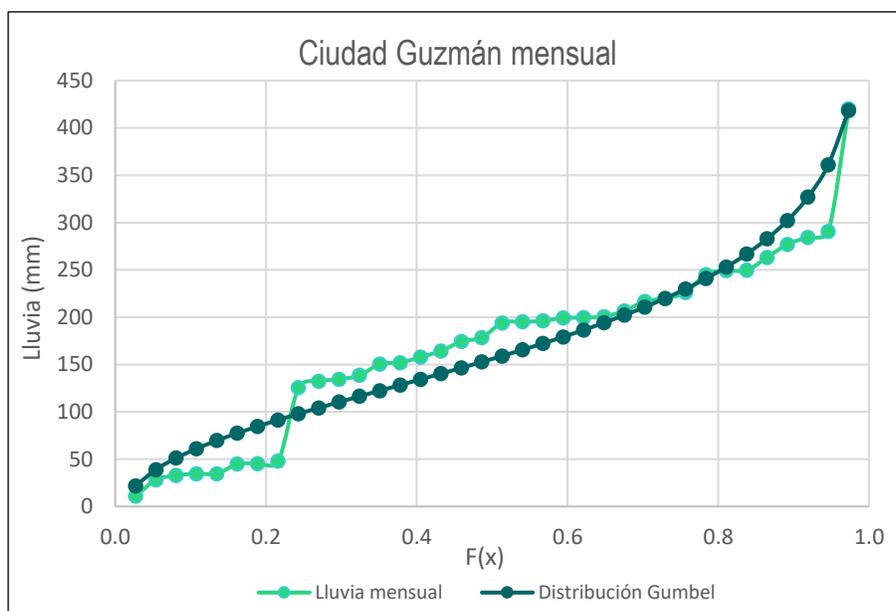


Figura 46: Precipitación máxima mensual, mostrando el ajuste a partir de la distribución de Gumbel.

Tabla 21: Lluvias mensuales esperadas en mm para 5, 10, 15 y 20 años.

Periodos de Retorno Mensual		
Años	F(x)	Lluvia (mm)
5	0.80	248.08
10	0.90	309.10
15	0.93	343.52
20	0.95	367.62

5.8 Simulaciones para la caracterización hidrológica de las cuencas y definición de las zonas de posible inundación

5.8.1 Simulación de lluvia/escorrentamiento

Las simulaciones de lluvia-escorrentamiento, realizadas con el programa FLO 2D, se hicieron para definir la respuesta hidrológica de las subcuencas a eventos de lluvia. Para el máximo de lluvia acumulada de 3-5 días se consideraron los valores por periodo de retorno de 5 y 20 años (Tabla 17), ya que es más notable la diferencia en cuanto al total de lluvia acumulada (100 mm vs 150 mm) y en dos escenarios diferentes: pre y post incendio 2019, y cambios de uso de suelo 2014-2022. De igual forma para el valor de lluvia acumulada en 1 día, se consideraron los valores de 65 mm y 90 mm, resultado del análisis de lluvia máxima diaria con periodos de retorno de 5 y 20 años respectivamente.

Al no tener una duración de los eventos de las precipitaciones, se hicieron las simulaciones considerando una lluvia continua de 14 horas para los eventos de 150 mm y 100 mm y de 1.5 horas para los eventos de 65 mm y 90 mm, tiempos que se aproximan a las lluvias observadas en el Volcán de Colima (Capra et al., 2010; 2018). Finalmente, además de conocer la respuesta hidrológica de las subcuencas, las simulaciones de lluvia-escorrimento sirvieron para definir la descarga de agua (volumen) en el río Salsipuedes para la simulación de flujos de escombros para estos escenarios.

Parámetros de infiltración

De acuerdo con los resultados de las características texturales de los sitios muestreados en campo, se clasificó el tipo de suelo en la cuenca de San Gabriel dentro del grupo C, aquellos suelos con texturas de moderadamente finas a finas, donde el potencial de escurrimento es moderadamente alto. Para definir el NC de cada subcuenca se utilizaron los mapas de uso de suelo según el escenario considerado (1 y 2). Con base en los valores reportados en la literatura, se definió el NC por cada tipo de cobertura para la cuenca (Tabla 22).

Tabla 22: Números de Curva (NC) asignada para cada cobertura de suelo en la cuenca San Gabriel.

Cobertura de suelo	Número de Curva
Zona urbana	100
Cultivos de aguacate	80
Cultivos varios	83
Vegetación natural	70
Suelos desnudos	86
Incendios	90

El mapa de uso de suelos realizado para toda la cuenca de San Gabriel consiste de 6530 polígonos, número demasiado elevado para poder simular con un NC por cada uno de ellos. Se optó por un valor promedio ponderado del NC por cada subcuenca con base en el porcentaje de cada cobertura de suelo como se observa en la Tabla 23.

Tabla 23: Número de Curva por cada subcuenca para el 2019, pre y post incendio.

Subcuenca	Número de Curva	
	Pre-incendio	Post-incendio
0	76.87	76.87
1	82.80	82.80
2	76.99	77.00
3	72.78	86.56

4	74.62	74.62
5	76.60	76.60
6	74.17	74.17
7	75.33	75.33
8	76.80	87.36
9	72.79	86.56
10	72.72	86.54
11	72.23	86.45

I. Escenario 1: Lluvias de 150 mm en 3-5 días, período de retorno de 20 años

a) 2019: pre y post incendio

En la figura 47 se muestra la ubicación de los perfiles trazados en la salida de cada subcuenca, para el cálculo de las descargas y en la figura 48 se observa las curvas de descarga en m^3/s , pre y post incendios, resultado de la simulación de una lluvia de 150 mm en 20 horas. En general se puede observar como las subcuencas con mayor afectación por los incendios muestran un evidente cambio en el pico máximo de descarga y en el volumen total de agua aportada por la escorrentía superficial (Tabla 24).

Esto se observa particularmente en las subcuencas 0, 1, 3, 8, 9, 10 y 11. Las subcuencas 8, 9, 10 y 11 son aquellas con mayor afectación por los incendios, mientras que las subcuencas 0, 1 y 3 son aquellas que reciben las descargas de las demás subcuencas por lo que reflejan los cambios pre y post incendio en toda la cuenca. En particular, en las subcuencas 0, 1 y 3 las descargas máximas incrementan de 10-20 m^3/s a un máximo de 160 m^3/s para la subcuenca 1 con un volumen máximo de 2 633 000 m^3 (Tabla 24). En las subcuencas mayormente afectadas por los incendios, como son la 8, 9, 10 y 11 se observa un comportamiento similar, con un incremento en la descarga hasta valores de 43 m^3/s para la subcuenca 8, y un volumen total de 928 200 m^3 (Figura 48). Es notable, además como en el escenario post incendio, especialmente en las subcuencas 0, 10 y 11, el pico de descarga se alcanza en las primeras horas, mientras que en las demás subcuencas no se observan variaciones relevantes.

Finalmente, las simulaciones de lluvia-escurrimiento permiten correlacionar la forma y morfometría de cada subcuenca (ver capítulo 5.1) con su comportamiento hidrogeológico (tiempo de llegada del pico de descarga) en donde se observa como las subcuencas con geometrías más alargadas (0, 3, 8) presentan un tiempo de llegada mayor a 14 horas, a diferencia de aquellas subcuencas con una geometría más circular, que presentan un tiempo menor de llegada del pico máximo (4, 7, 9), con un tiempo de 11 a 12 horas.

b) Cambio de uso de suelo 2014-2022

La descarga y volumen de agua de las subcuencas también están ligadas al cambio de uso de suelo y vegetación a lo largo de un determinado tiempo, en este caso a través de 8 años (2014-2022). Del resultado de las simulaciones se observa un aumento importante en la descarga y en volumen de agua desde el año 2014 hasta la actualidad 2022, principalmente en las subcuencas 0, 1, 3, 10 y 11. La subcuenca 1, en el año 2014 tuvo una descarga de 14 m³/s, en el 2019 (año del evento), la descarga aumentó a 15 m³/s y finalmente, en el año 2022 esta es de 23.2 m³/s.

La subcuenca 0 y 3 presentan el mismo comportamiento anterior, siendo estas subcuencas (0, 1, 3) las que mayor cambio han sufrido desde una vegetación natural a zonas de cultivos, y un aumento en la zona urbana. La subcuenca 8 también presenta un aumento en la descarga del año 2014 al 2019, sin embargo, para los siguientes años no presenta un cambio notable, donde más del 50% de la superficie en esta cuenca es destinada al cultivo. Algunas subcuencas como 2, 4, 5, 6, no muestran variaciones significativas en los valores de descarga (Tabla 24), por ejemplo, la subcuenca 2 presenta un valor semejante de descarga de 8 m³/s en el lapso de tiempo analizado, debido a que en estas subcuencas (2 y 5) no hay cambios relevantes en la cobertura del suelo y vegetación.

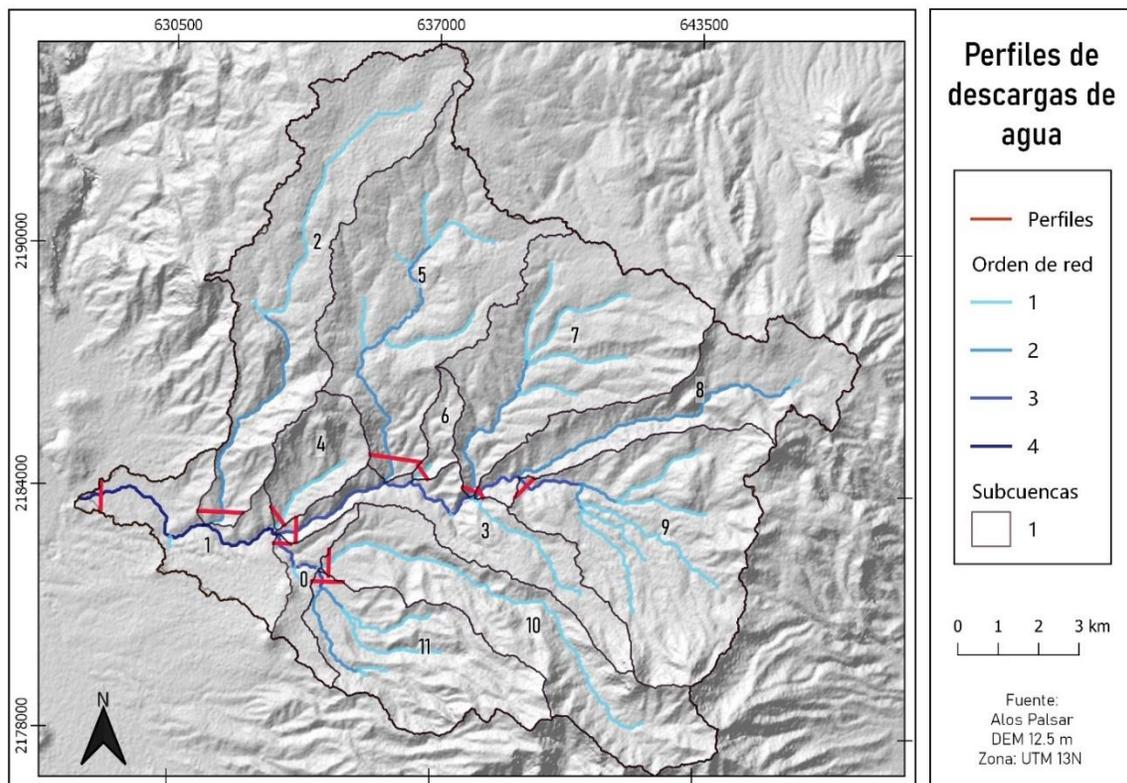
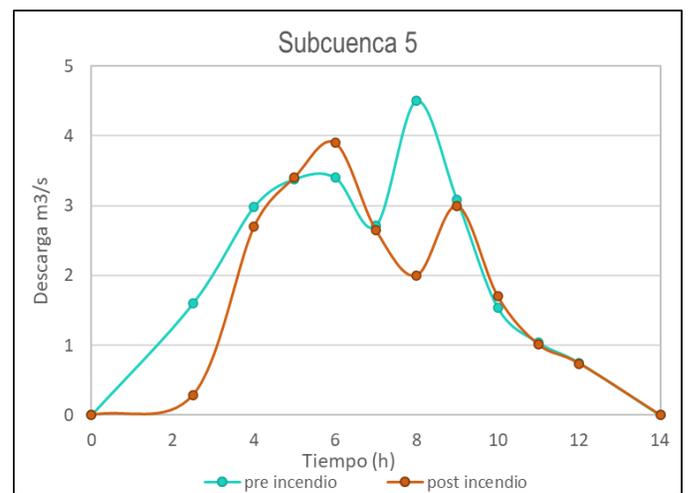
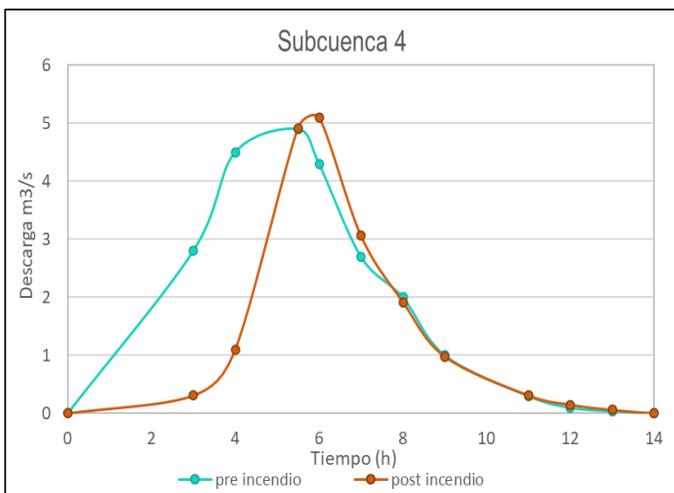
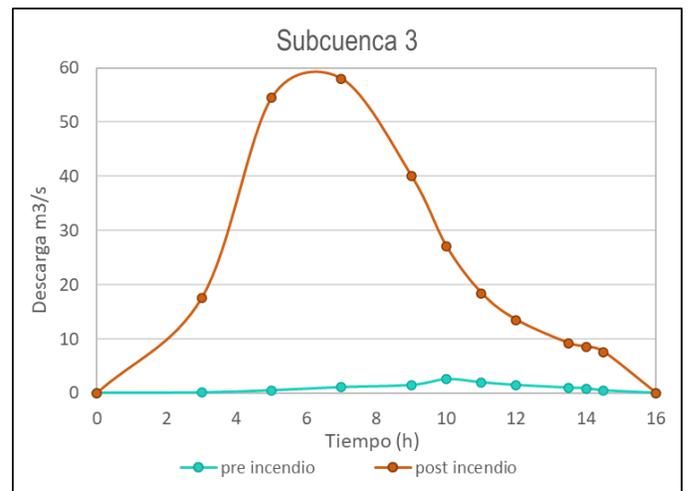
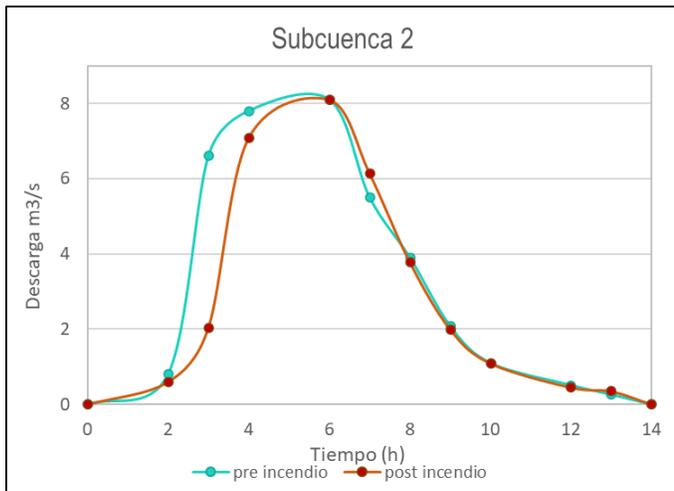
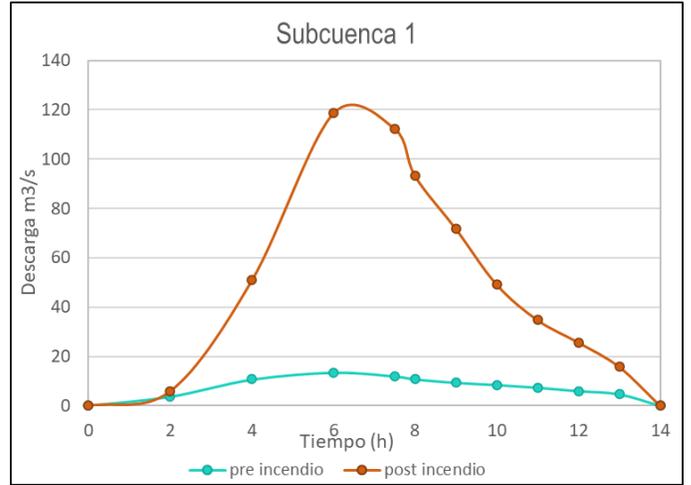
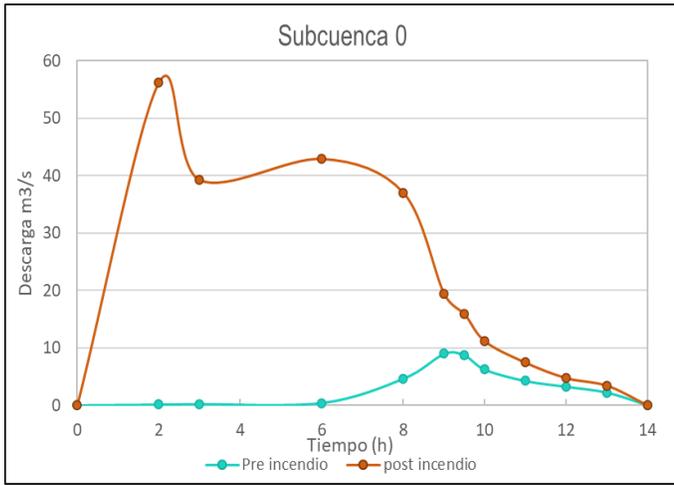


Figura 47: Ubicación de los perfiles utilizados para el cálculo de las descargas de agua en cada subcuenca.

Tabla 24: Valores de tiempo, descargas y volumen máximo para cada subcuenca, para lluvias de 150 mm y usando el Número de Curva para 3 años 2014, 2019 y 2022 (correspondiente a los años analizados en el cambio de uso de suelo) y post incendio; K_G : Índice de Gravelius, NC: número de Curva.

Subcuenca		NC_2014			NC_2019			NC_2022			NC_post		
Sub	K_G	Tiempo (h)	Descarga (m ³ /s)	Volumen (m ³)	Tiempo (h)	Descarga máx.	Volumen (m ³)	Tiempo (h)	Descarga (m ³ /s)	Volumen (m ³)	Tiempo (h)	Descarga (m ³ /s)	Volumen (m ³)
0	2.9	15.5	5.3	35790.6	15.0	8.7	109305.4	14.6	11.1	144308.7	7.6	56.1	1224301.9
1	2.5	13.4	14.0	268842.1	13.5	15.1	343746.8	12.0	23.2	605 758.2	12.1	119.4	2633570.4
2	2.6	11.6	8.1	140656.9	12.0	8.1	140974.2	11.8	8.5	163732.6	11.8	8.1	136640.3
3	2.9	11.9	0.2	4746.3	19.0	2.6	11909.8	16.4	6.2	46012.0	12.4	60.3	1229177.9
4	1.5	12.0	5.1	65116.9	12.0	4.9	58316.5	12.0	5.9	124028.5	11.7	5.0	57262.4
5	2.1	12.0	3.2	75146.5	14.2	4.2	86853.1	14.0	4.9	94196.0	14.3	3.7	82695.0
6	2.0	11.9	1.7	20307.8	11.8	1.7	19835.7	11.0	1.8	2643.6	12.0	1.8	19659.2
7	1.9	11.6	0.03	253.6	13.5	0.7	3225.8	13.0	0.8	5823.5	9.2	0.6	6251.6
8	2.6	9.3	0.07	161.3	17.4	0.6	5060.4	11.8	0.6	3360.2	12.2	43.0	928199.3
9	1.7	12.4	0.1	330.9	11.0	0.1	440.1	10.4	0.1	442.4	12.0	30.9	695053.9
10	2.3	14.2	2.2	22972.1	14.7	6.1	77057.6	14.2	7.9	95904.3	7.4	35.2	719352.4
11	1.8	15.0	2.3	20046.5	14.0	3.2	39768.1	14.1	3.1	37871.2	7.2	22.5	512768.5



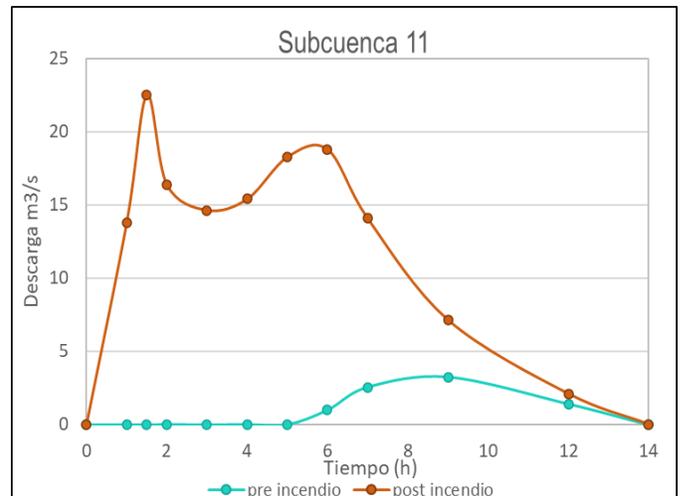
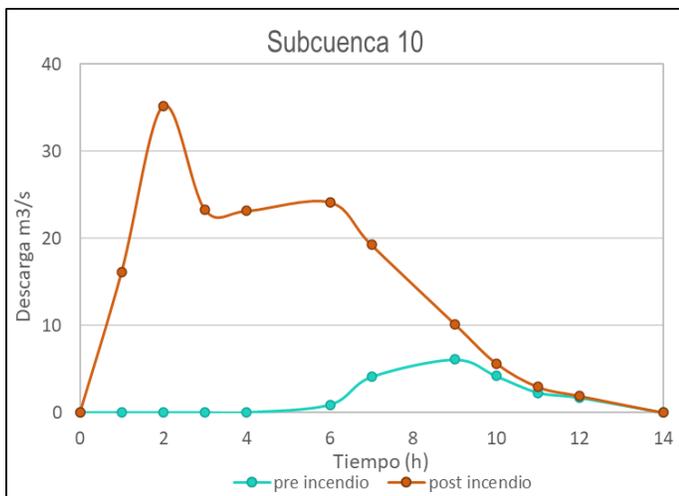
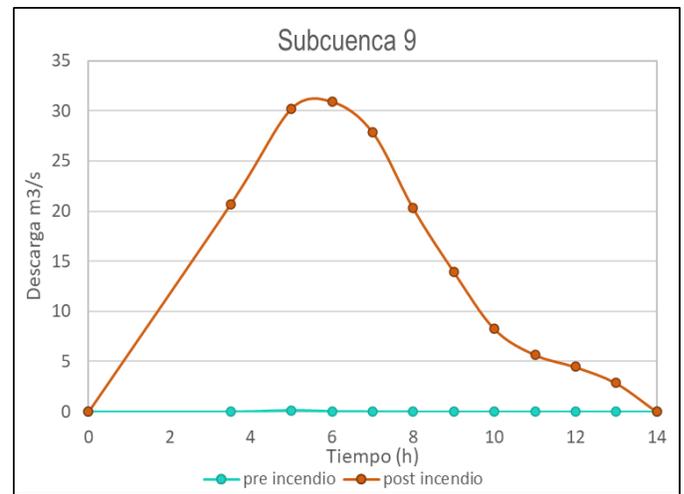
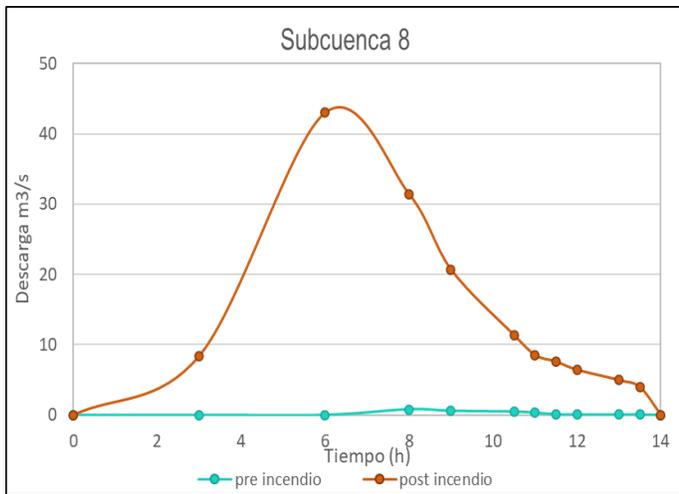
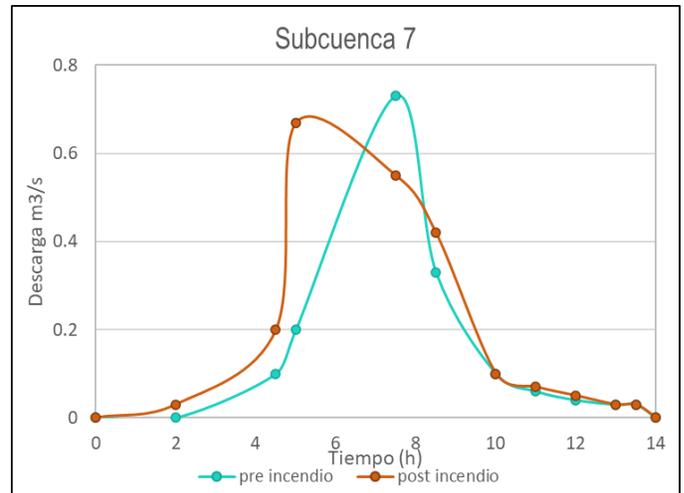
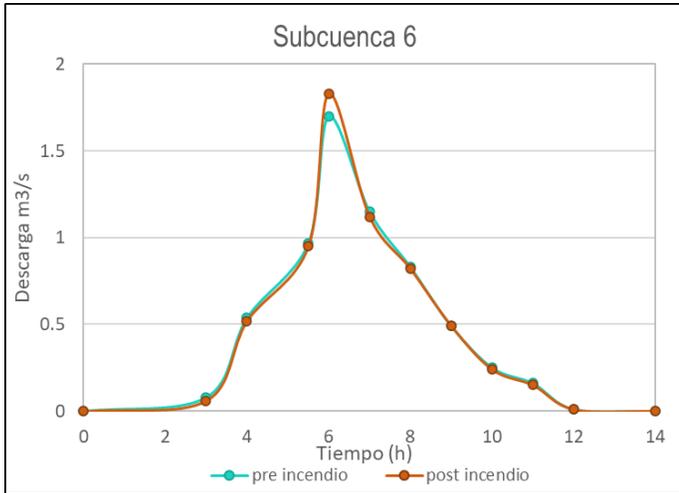


Figura 48: Gráficas de descarga en m3/s para cada subcuenca, pre y post incendio, resultado de simular una lluvia de 150 mm.

II. Escenario 2: 100 mm en 3-5 días, periodo de retorno de 5 años

Para el escenario de 100 mm, con período de retorno de 5 años, se obtuvieron valores de descarga bajos, para la subcuenca 1 es de 9.4 m³/s para el escenario post-incendio, y de 1.5 m³/s para el escenario pre-incendio. Uno de los problemas principales en desconocer el tiempo de duración de la lluvia es que, al promediar la cantidad de precipitación sobre un tiempo demasiado largo, resulta en una lluvia de baja intensidad, lo que promueve la infiltración del mayor volumen de la lluvia acumulada.

III. Escenario 3: 90 mm en 1 día, periodo de retorno de 20 años

Este escenario, corresponde al análisis de la lluvia máxima diaria, con un periodo de retorno de 20 años. Las simulaciones realizadas considerando el promedio ponderado del NC para cada subcuenca, no permitieron obtener curvas de descarga, posiblemente por alguna limitación del código o por el tamaño de la malla para el cálculo. El propósito de realizar estas simulaciones es para poder obtener un valor de volumen de agua por subcuenca, para la simulación de flujos de escombros, para eso se optó por simular la lluvia con un NC global de 90 y considerar la curva de descarga de la subcuenca 1, que corresponde al drenaje principal del río Salsipuedes. El valor de lluvia de 65 mm (período de retorno de 5 años), no fue considerado, ya que los valores de descarga generados fueron mínimos.

5.8.2 Simulación de flujos de escombros

Las simulaciones de flujos de escombros se realizaron para los siguientes escenarios: 1) 2019 pre y post incendio; escenario 2) 100 mm post incendio (para el escenario pre incendio las descargas fueron mínimas) y el escenario 3) 90 mm.

Las curvas hidrográficas se construyeron para la subcuenca 1, ya que en ella drenan todas las demás subcuencas, a partir de un hidrograma unitario triangular y utilizando el volumen total de agua de descarga simulada, (i.e Caballero y Capra, 2015). Para los parámetros reológicos se seleccionaron los valores correspondientes a Glenwood 1, 2, 3 y 4 (Tabla 25), (O'Brien y Julien, 1988) para tomar en cuenta la posible variabilidad en la reología del flujo, según el contenido de fracción fina. Con respecto a la concentración de sedimentos, se realizó la distribución en el tiempo partiendo de un valor de 0.1, y aumentando gradualmente hasta un valor máximo de 0.35.

Como anteriormente mencionado, no se cuenta con datos directos de las características del flujo del 2019, sin embargo, al observar los límites de inundación en la zona urbana (altura del flujo) y las características del material depositado (abundancia de troncos y depósitos de grava y arenas), se considera que el flujo estaba bastante diluido. Es importante mencionar que no se tiene suficiente

información para poder realizar un procedimiento de calibración de los parámetros con base en la distribución del evento ocurrido en el 2019, por lo anterior, se decidió realizar las simulaciones por escenarios y discutir los resultados obtenidos con base en los pocos datos de profundidad del flujo observados en la zona urbana de San Gabriel y así definir cuál de los escenarios simulados se aproxima al evento observado.

Tabla 25: Parámetros reológicos utilizados para las simulaciones de flujos de agua y sedimentos, O'Brien y Julien, 1998.

Parámetros reológicos				
	Glenwood 1	Glenwood 2	Glenwood 3	Glenwood 4
Coefficiente de Manning	0.065	0.065	0.065	0.065
Número de Froude	0.9	0.9	0.9	0.9
Viscosidad	$\eta = 0.00283e^{23Cv}$	$\eta = 0.0648e^{6.2Cv}$	$\eta = 0.00632e^{19.9Cv}$	$\eta = 0.000602e^{33.1Cv}$
Resistencia al corte	$\tau_y = 0.0345e^{20.1Cv}$	$\tau_y = 0.0765e^{16.9Cv}$	$\tau_y = 0.000707e^{29.8Cv}$	$\tau_y = 0.00172e^{29.5Cv}$

I. *Escenario 1:*

Los resultados que se muestran a continuación, corresponden a las simulaciones de flujos de escombros, construidas a partir de la descarga (volumen máximo) de la subcuenca 1 pre-incendio para lluvias de 150 mm, con una descarga máxima de 150 m³/s (Tabla 26 y Figura 49).

Tabla 26: Muestra las descargas *pre incendio* de la subcuenca 1, distribuidas en 2 horas, con su respectiva concentración de sedimentos (Cv).

Tiempo (h)	Descarga (m ³ /s)	Cv	Tiempo (h)	Descarga (m ³ /s)	Cv
0.00	0	0	1.00	112.50	0.30
0.08	18.75	0.20	1.17	93.75	0.20
0.17	37.50	0.20	1.25	84.38	0.20
0.25	56.25	0.20	1.33	75.00	0.20
0.33	75.00	0.20	1.42	65.63	0.20
0.42	93.75	0.20	1.50	56.25	0.20
0.50	112.50	0.35	1.58	46.88	0.20
0.58	131.25	0.35	1.67	37.50	0.20
0.67	150.00	0.35	1.75	28.13	0.20
0.75	140.63	0.35	1.83	18.75	0.20
0.83	131.25	0.35	1.92	9.38	0.10
0.92	121.88	0.30	2.00	0.00	0.00

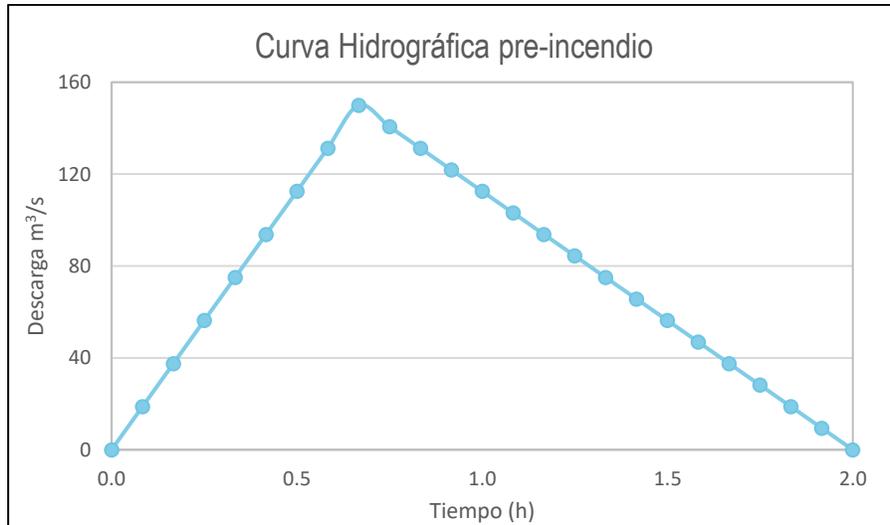


Figura 49: Curva hidrográfica pre incendio, para la subcuenca 1 en un tiempo de 2 horas.

La Tabla 27 corresponde a las descargas post-incendios de la subcuenca 1 con su respectiva curva hidrográfica (Figura 50).

Tabla 27: Descargas *post incendio* en m³/s para la subcuenca 1; Cv: concentración de sedimentos.

Tiempo (h)	Descarga (m ³ /s)	Cv	Tiempo (h)	Descarga (m ³ /s)	Cv
0.00	0.00	0.00	1.00	487.50	0.30
0.08	81.25	0.10	1.17	406.25	0.20
0.17	162.50	0.20	1.25	365.63	0.20
0.25	243.75	0.20	1.33	325.00	0.20
0.33	325.00	0.20	1.42	284.38	0.20
0.42	406.25	0.20	1.50	243.75	0.20
0.50	487.50	0.35	1.58	203.13	0.20
0.58	568.75	0.35	1.67	162.50	0.20
0.67	650.00	0.35	1.75	121.88	0.20
0.75	609.38	0.35	1.83	81.25	0.10
0.83	568.75	0.35	1.92	40.63	0.10
0.92	528.13	0.30	2.00	0.00	0.00

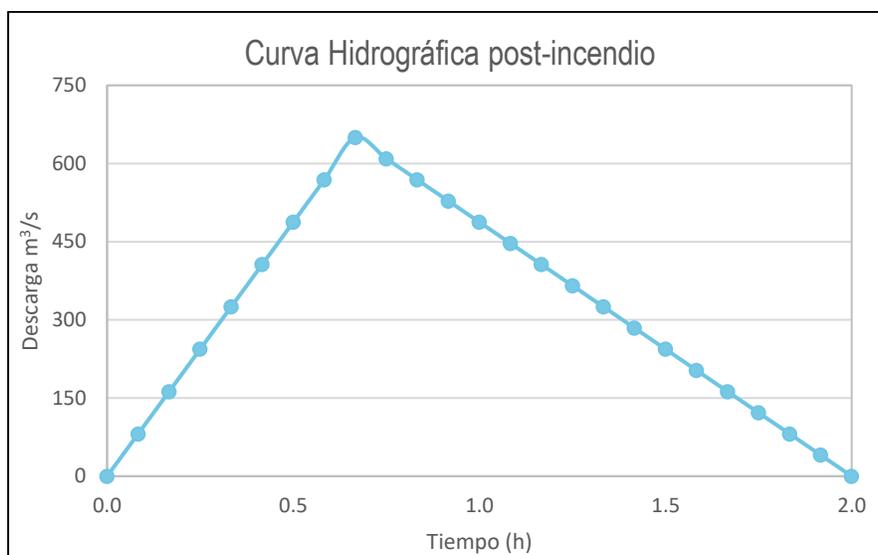


Figura 50: Curva hidrográfica post incendio, distribuidas en 2 horas para la subcuenca 1.

La simulación de flujo de escombros pre-incendio presenta profundidades de aproximadamente 9 metros al inicio del flujo, para disminuir hacia la zona media con profundidades de 5 metros, llegando a inundar la cabecera municipal de San Gabriel con profundidades de 3 metros, hasta espesores menores a 1 metro, con un volumen total simulado de 743 405 m³. Con respecto al flujo post-incendio, este aumenta tanto en profundidad como en superficie de inundación, hasta tener valores de 13 metros en la parte más proximal, que se reduce en la parte media con profundidades de 7 a 9 metros; en la zona urbana, el flujo alcanza espesores de hasta 3 metros, con un volumen total simulado de 3 214 660 m³ (Tabla 32).

Como anteriormente se mencionó, se compararon los resultados con los niveles del flujo del 2 de junio de 2019 (trabajo de campo), en cuatro puntos de control a lo largo del río Salsipuedes, tanto para el escenario pre incendio, como para post incendio. Es importante subrayar que la resolución del DEM a 12.5 m no permite reproducir con detalle la geometría real del canal, especialmente en la zona urbana, donde esto ha sido modificado y recubierto de concreto. El flujo simulado sobreestima la inundación lateral y calcula una profundidad menor. Se realizaron simulaciones con una malla computacional de 12.5 m (igual a la resolución del DEM), sin embargo, como se describe más adelante, la resolución de la malla no afecta de manera importante cuando no se cuenta con un DEM de buena resolución.

El *perfil 1* corresponde a la zona central del poblado de San Gabriel, donde se registró el mayor daño a la infraestructura, a partir de las fotografías se puede estimar una profundidad máxima del flujo entre 4 y 5 metros, desde la parte más baja del canal del drenaje (Figura 51). En este punto, la profundidad máxima del flujo que se obtiene de las simulaciones es de 1.8 metros para el escenario pre incendio y de 3.8 m

para post incendio. Con respecto al *perfil 2*, localizado en una porción del canal del drenaje con una profundidad aproximada de 2 m y que limita con una unidad habitacional de reciente construcción y que corresponde al punto de toma del video, las profundidades máximas son de 1.3 m a 2.6 metros para el escenario post incendio. Los *perfiles 3 y 4* corresponden al canal en zonas de cultivo con profundidades promedio de 2 metros. Para el *perfil 3* los espesores están delimitados entre 1 a 2.5 metros; con la malla computacional de 12.5 m. el espesor aumenta 30 cm más (Figura 51: continuación). Para el último *perfil 4*, la profundidad disminuye con valores de 0.20 m a 0.80 m, para la malla computacional de 30 m; en la simulación con una malla de 12.5 m las profundidades varían a lo largo del perfil de 0.40 cm hasta 1.2 metros (Figura 52). Con base en estos resultados, el escenario post incendio se aproxima mejor en las profundidades del flujo asociadas al evento del 2 de junio de 2019.

La tabla 28 resume los resultados de las profundidades máximas en los 4 perfiles, obtenidos al simular flujos de escombros variando los parámetros reológicos utilizados en la tabla 25. Como se puede observar, se alcanzan profundidades mayores al utilizar el parámetro Glenwood 3 para ambos escenarios, con más de 4 metros de espesor en el perfil 3. Para integrar tanto los escenarios pre y post incendios y los diferentes parámetros reológicos (total de 8 simulaciones), se realizó un solo mapa con el promedio de los espesores (Figura 53). Las profundidades promedio registradas en la cabecera municipal de San Gabriel varían de un máximo de 4.7 metros a 1 metro.

Tabla 28: Espesores máximos en metros a lo largo de los 4 perfiles al variar los parámetros reológicos para el escenario 1.

		Espesores máximos (m)			
	Escenarios	Glenwood 1	Glenwood 2	Glenwood 3	Glenwood 4
Perfil 1	Pre incendio	2.14	1.75	1.76	1.73
	Post incendio	3.18	3.18	3.19	3.43
Perfil 2	Pre incendio	1.62	1.24	1.62	1.24
	Post incendio	2.62	2.65	2.68	2.62
Perfil 3	Pre incendio	2.52	2.53	2.01	2.55
	Post incendio	3.26	3.30	4.16	4.10
Perfil 4	Pre incendio	1.85	1.24	1.95	1.96
	Post incendio	3.13	2.57	3.22	3.15

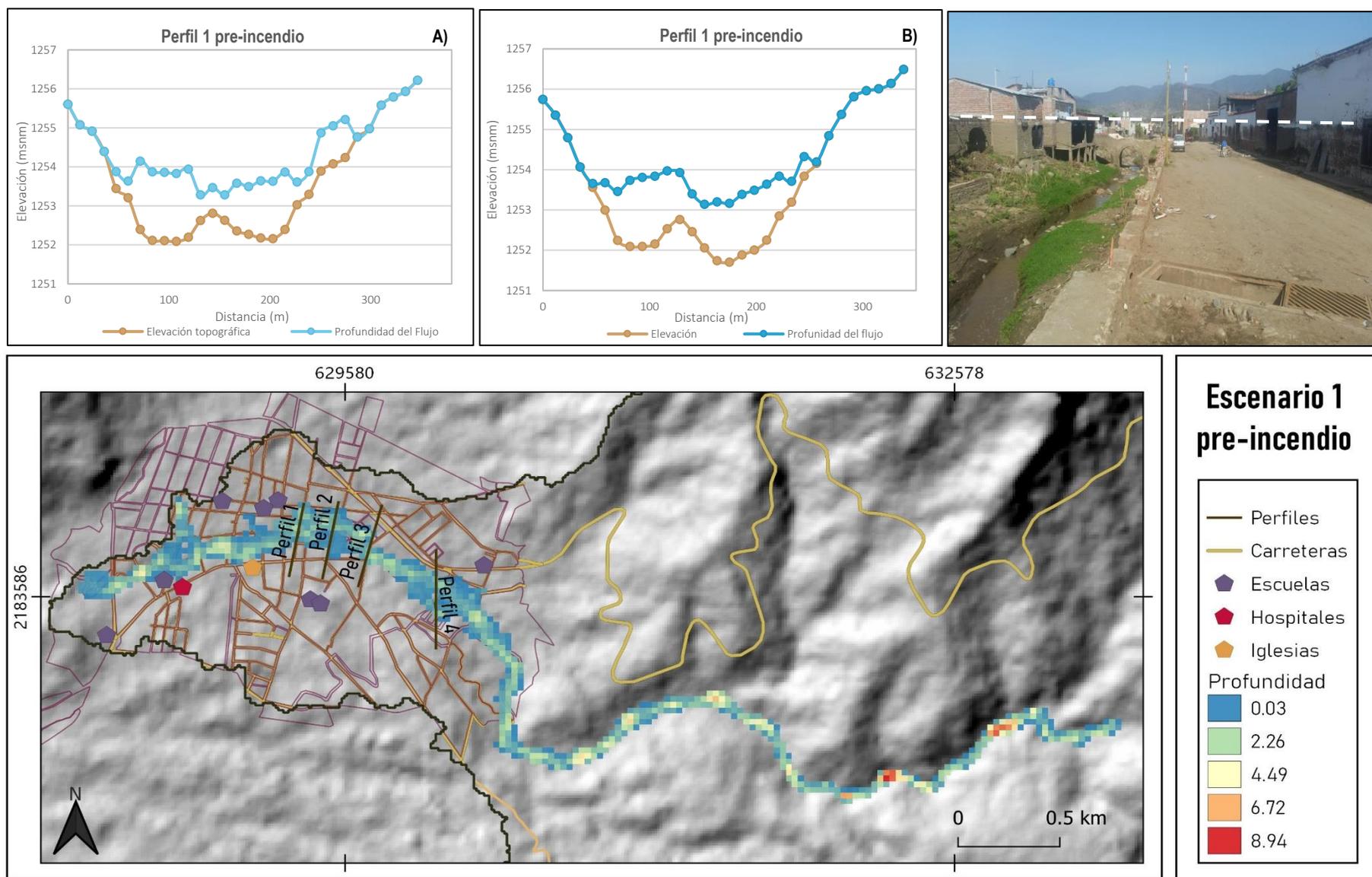


Figura 51: Mapa que muestra el flujo de agua y sedimentos pre incendio del escenario 1. Se indican los 4 perfiles trazados en la cabecera municipal de San Gabriel y se comparan las profundidades del flujo en metros con las observaciones en campo (fotografías); A) simulación con resolución de 30 m. y B) resolución de 12.5 m.

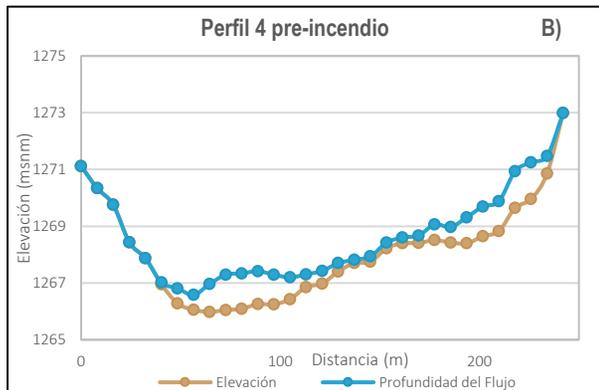
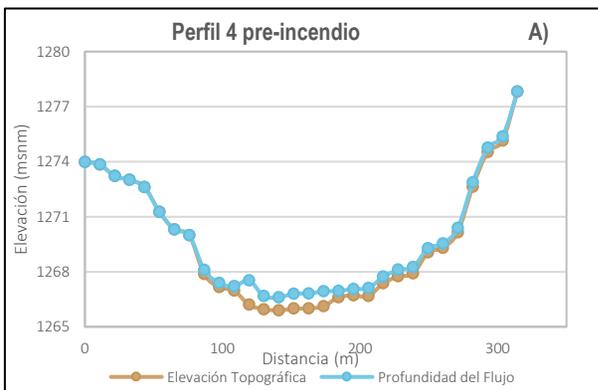
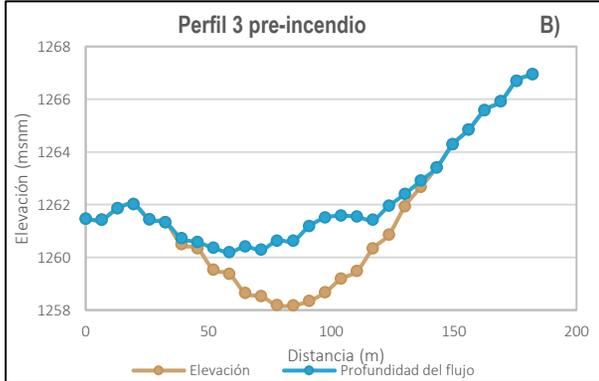
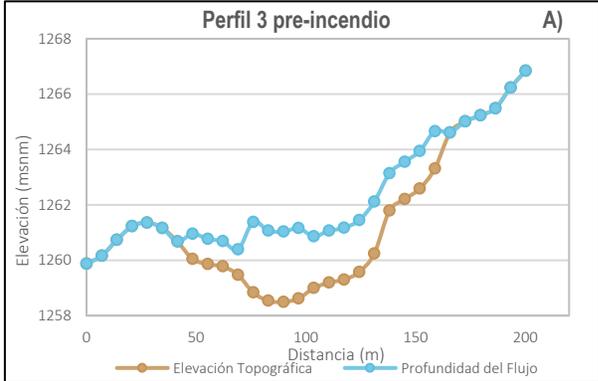
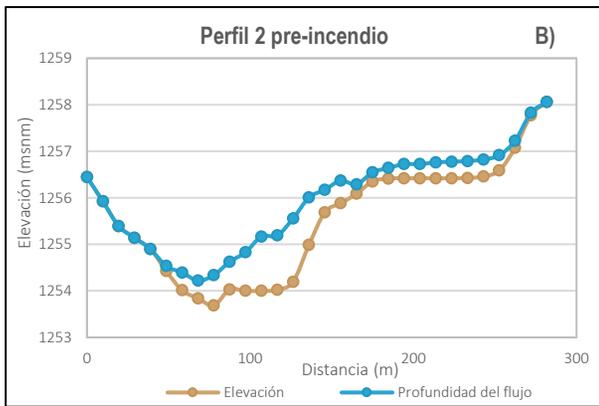
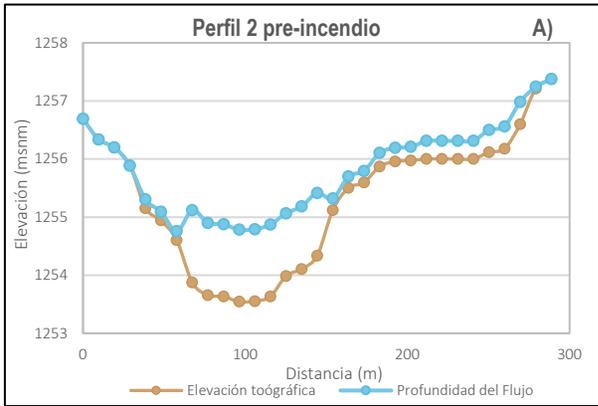


Figura 5 1: Continuación

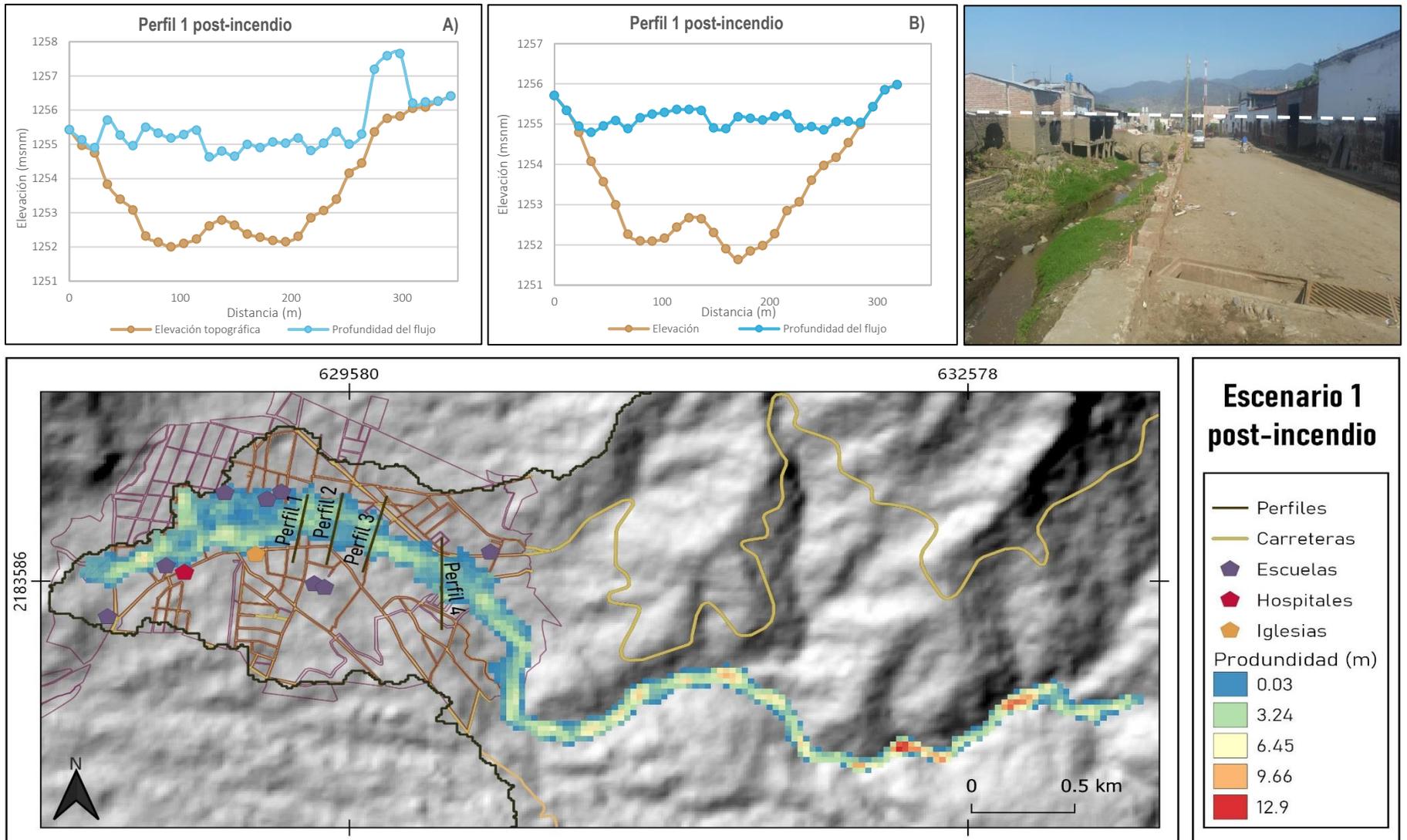
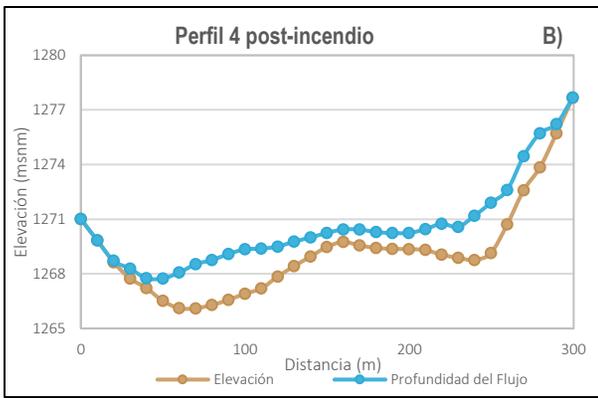
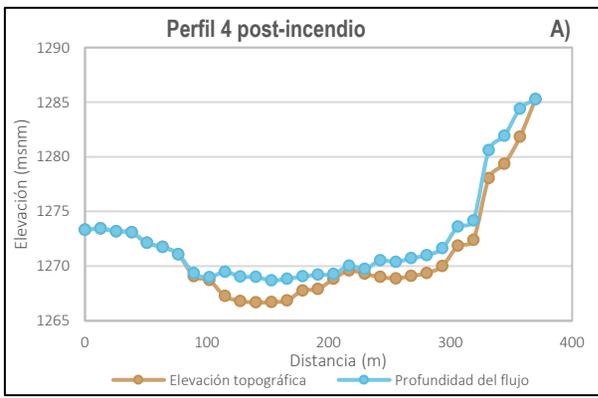
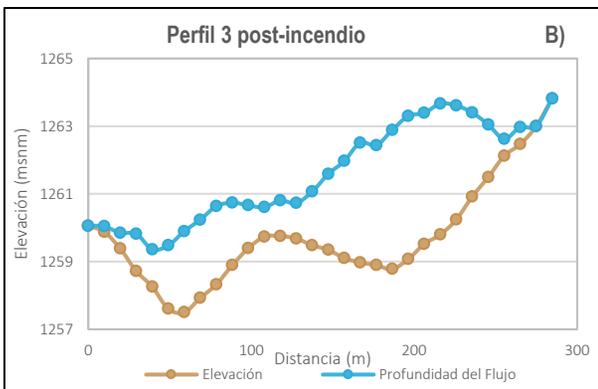
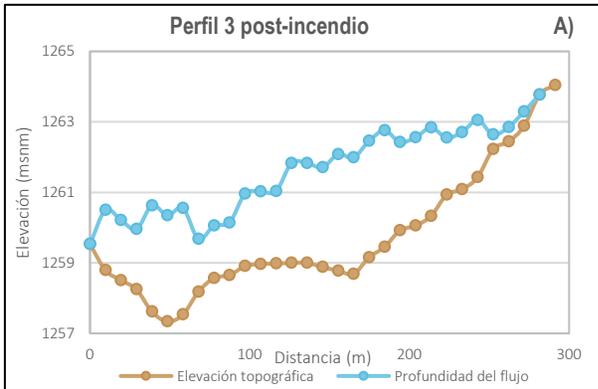
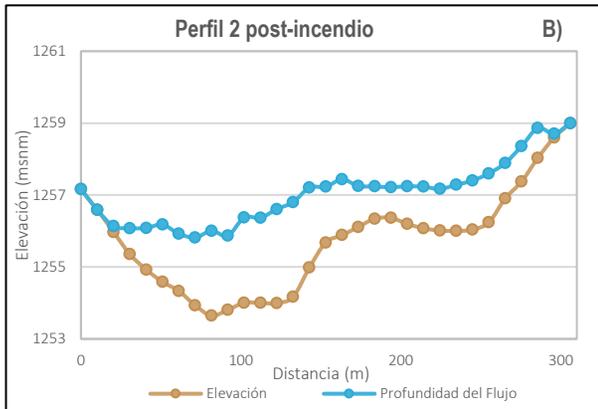
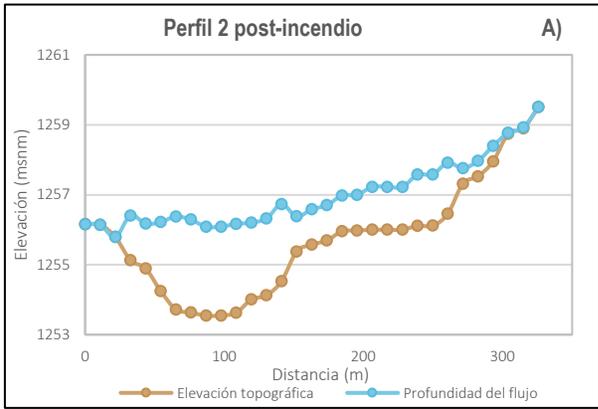


Figura 52: Mapa donde se observa la simulación de flujo de agua y sedimentos post incendio del escenario 1. Se indican los 4 perfiles trazados, comparando las profundidades del flujo observado en campo; A) Simulaciones con malla computacional de 30 m. y B) Malla computacional de 12.5 m.



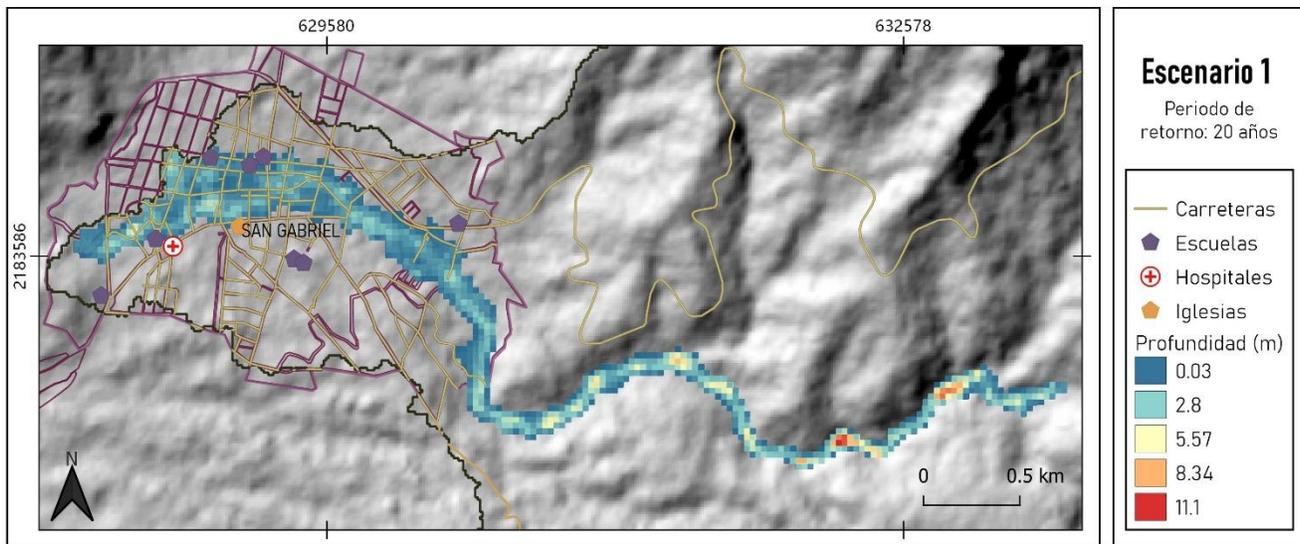


Figura 53: Mapa que muestra los espesores promedio, al integrar los escenarios *pre* y *post incendio*, así como los diferentes parámetros reológicos.

II. Escenario 2

La misma metodología se utilizó para las simulaciones de flujos de escombros a partir del escenario de lluvia de 100 mm, (Tabla 29 y Figura 54). De igual manera se realizaron simulaciones variando la reología de los flujos de la Tabla 25.

Tabla 29: Valores de las descargas *post incendio* con su respectiva concentración de sedimentos (C_v), correspondiente a la subcuenca 1, en un tiempo de 1 hora.

Tiempo (h)	Descarga (m^3/s)	C_v	Tiempo (h)	Descarga (m^3/s)	C_v
0.00	0.00	0.00	0.50	39.75	0.30
0.04	6.63	0.20	0.54	36.44	0.20
0.08	13.25	0.20	0.63	29.81	0.20
0.13	19.88	0.20	0.67	26.50	0.20
0.17	26.50	0.20	0.71	23.19	0.20
0.21	33.13	0.20	0.75	19.88	0.20
0.25	39.75	0.35	0.79	16.56	0.20
0.29	46.38	0.35	0.83	13.25	0.20
0.33	48.12	0.35	0.88	9.94	0.20
0.38	49.69	0.35	0.92	6.63	0.20
0.42	46.38	0.35	0.96	3.31	0.20
0.46	43.06	0.30	1.00	0.00	0.00

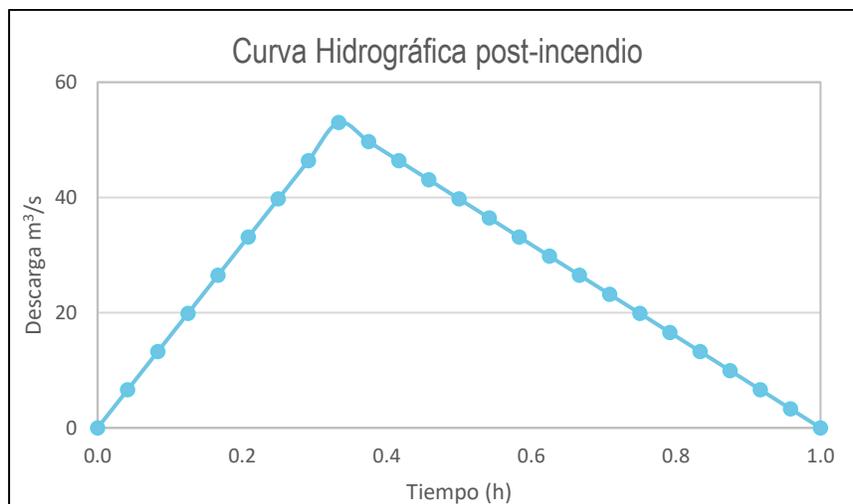


Figura 54: Gráfica de la curva hidrográfica *post incendio*, perteneciente a la subcuenca 1.

A continuación, se describe el escenario para una lluvia de 100 mm post incendio que corresponde a un periodo de retorno de 5 años. En este escenario el flujo de escombros disminuye en alcance y volumen (Tabla 32), presentando valores máximos de espesor de 7.2 m. (Figura 55). En la población de San Gabriel, las profundidades promedio del flujo se encuentran entre 1.6 metros y 0.80 m, en campo estas profundidades fueron registradas desde los 2 metros hasta alcanzar en algunos canales los 4 m. Los valores obtenidos para este escenario son notablemente inferiores a los observados en campo.

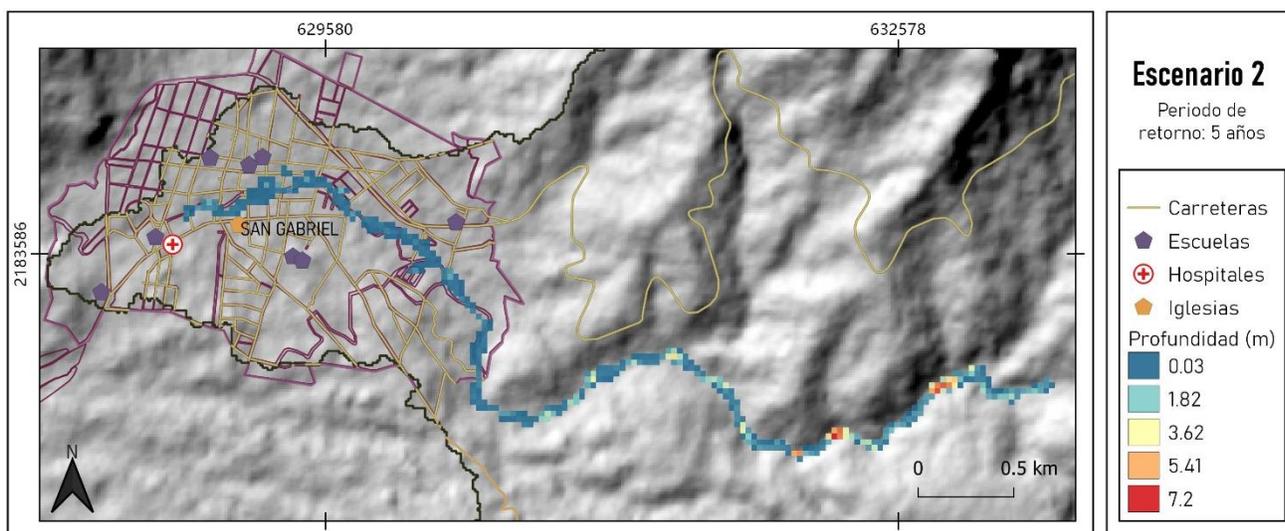


Figura 55: Mapa que muestra las profundidades promedio de un flujo de escombros en San Gabriel, Jalisco, para el escenario 2 post incendio.

III. Escenario 3

Para el flujo de escombros en este escenario, se construyó una curva hidrográfica partir del volumen máximo de la subcuenca 1 (Figura 56, Tabla 30), también se realizaron simulaciones con diferentes parámetros reológicos, para conocer las profundidades máximas alcanzadas por los flujos en el poblado de San Gabriel.

Tabla 30: Valores de descarga y concentración de sedimentos (Cv), distribuidas en 1 hora.

Tiempo (h)	Descarga (m ³ /s)	Cv	Tiempo (h)	Descarga (m ³ /s)	Cv
0	0	0	0.5	62.25	0.3
0.04	10.38	0.2	0.54	57.06	0.2
0.08	20.75	0.2	0.63	46.69	0.2
0.13	31.13	0.2	0.67	41.5	0.2
0.17	41.5	0.2	0.71	36.31	0.2
0.21	51.88	0.2	0.75	31.13	0.2
0.25	62.25	0.35	0.79	25.94	0.2
0.29	72.63	0.35	0.83	20.75	0.2
0.33	83.00	0.35	0.88	15.56	0.2
0.38	77.81	0.35	0.92	10.38	0.2
0.42	72.63	0.35	0.96	5.19	0.1
0.46	67.44	0.3	1	0	0

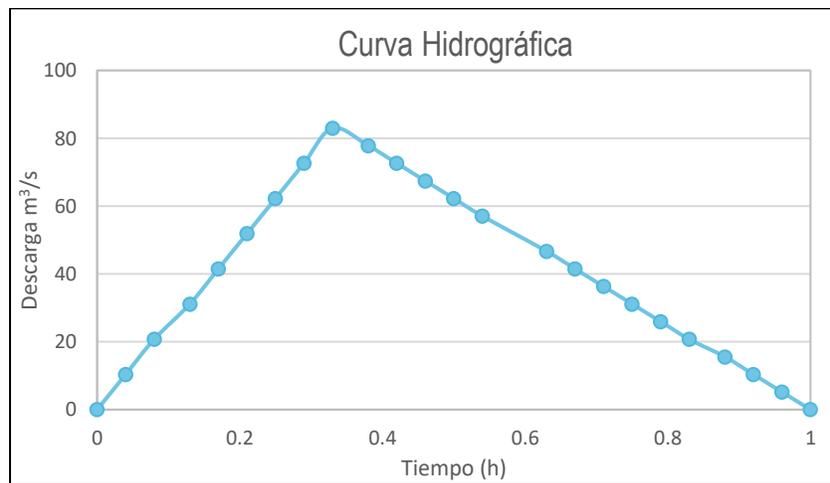


Figura 56: Curva hidrográfica utilizada para la simulación de flujos de escombros.

Como se puede observar en la Tabla 31, al variar los parámetros reológicos (Glenwood 1, 2, 3 y 4), las profundidades que alcanzó el flujo de escombros en la cabecera municipal de San Gabriel, no presentan cambios significativos, aumentando la profundidad solo 20 centímetros para el perfil 2 y con parámetros reológicos más viscosos (Glenwood 3). Las profundidades promedio máximas alcanzadas del flujo de escombros para este escenario son de 7.9 metros, disminuyendo hasta valores

menores de 0.3 m (Figura 57), mientras que, en el área del municipio de San Gabriel, el flujo presenta profundidades promedio máximas de 3 metros a valores mínimos de 0.30 metros. Su distribución es la que más se aproxima a la traza del flujo que se puede distinguir en la imagen Sentinel-2 adquirida el 2 de julio de 2019 (Figura 5).

Tabla 31: Espesores máximos en metros del flujo de escombros, calculados para cada perfil y para diferentes parámetros reológicos.

Espesores máx.	Glenwood 1	Glenwood 2	Glenwood 3	Glenwood 4
Perfil 1	1.19	1.18	1.18	1.19
Perfil 2	0.68	0.42	0.68	0.67
Perfil 3	1.50	1.55	1.54	1.54
Perfil 4	1.27	1.26	1.28	1.26

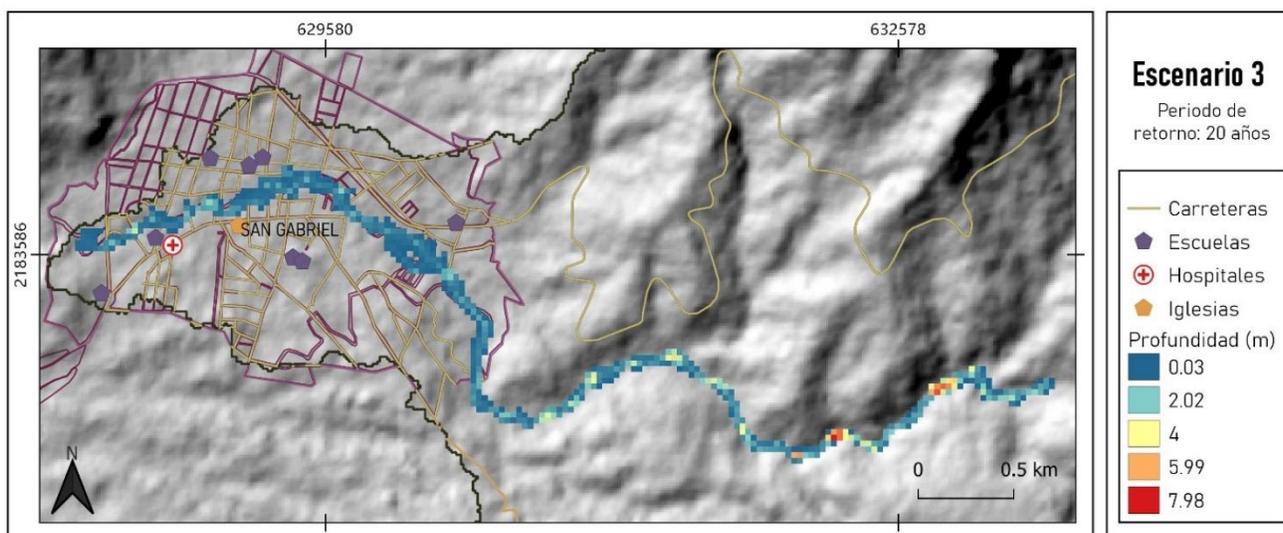


Figura 57: Mapa de las profundidades promedio, para el escenario 3: 90 mm, al integrar las simulaciones cambiando los parámetros reológicos.

Tabla 32: Volumen de los flujos de escombros, resultado de las simulaciones. Escenario 1: 150 mm de lluvia acumulada de 3-5 días, período de retorno de 20 años; Escenario 2: Lluvia de 100 mm acumulada de 3-5 días, período de retorno de 5 años y Escenario 3: Lluvia de 90 mm acumulada en 1 día, período de retorno de 20 años.

Volumen del flujo simulado	
Escenario 1:	3 214 660 m ³
Escenario 2:	132 680 m ³
Escenario 3:	206 205 m ³

5.8.3 Mapa de inundaciones

Finalmente, con los resultados anteriores se realizó el mapa de inundaciones, indicando las zonas expuestas ante la formación de flujos de escombros, respuesta de lluvias con niveles de 150 mm, 100

mm y 90 mm. Para escenarios mayores como el escenario 1 y periodo de retorno de 20 años, el flujo se expande lateralmente, principalmente al llegar al municipio de San Gabriel en comparación al flujo de escombros del escenario 3 con una menor área lateral de inundación, y presenta un mayor alcance caso contrario al alcance que desarrollan aquellos flujos con un periodo de retorno menor de 5 años (Figura 58).

Las áreas susceptibles a ser afectadas, de acuerdo a los flujos simulados incluyen a escuelas como: “Venustiano Carranza”, Primaria “Edmundo Figueroa”, también a plazas como “Juan Rulfo” y “Plaza de Armas”, capaz de generar inundaciones de hasta 0.35 m en el Hospital “IMSS 63”, afectando también a Iglesias y Templos. Los puentes son una de las infraestructuras que igualmente son afectadas por estos eventos, incluyendo diversos caminos y carreteras.

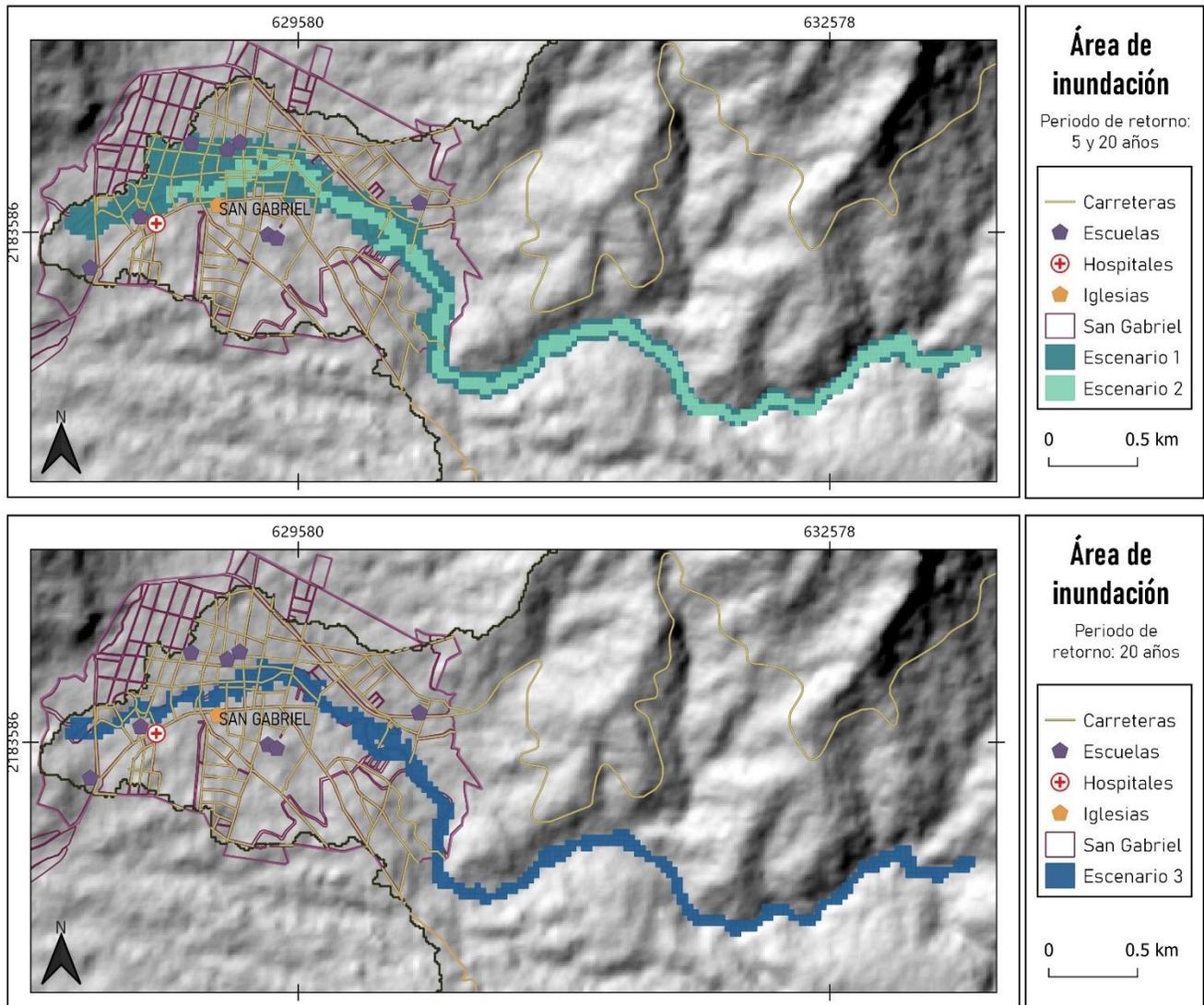


Figura 58: Mapas donde se muestran las áreas de inundación en la cuenca de San Gabriel, para los periodos de retorno de 5 y 20 años.

Capítulo 6: Discusión

El objetivo principal del presente trabajo fue definir cómo los cambios de uso de suelo inducido por la actividad antrópica o por procesos indirectos asociados a cambios climáticos como son los incendios causados en épocas de sequías, pueden promover procesos erosivos durante eventos hidrometeorológicos y de allí la formación de flujos de escombros. En particular, las características hidrológicas de suelos agrícolas, así como los afectados por incendios cambian drásticamente limitando un proceso de infiltración respecto a suelos con una cobertura de vegetación natural. La cuenca de San Gabriel en el estado de Jalisco resultó ser un área de estudio idónea considerando el evidente cambio de uso de suelo por cultivos intensos de aguacate y por haber sido afectada por incendios durante el 2019, con la formación posterior de un flujo de escombros en el río Salsipuedes que provocó la muerte de tres personas en el municipio de San Gabriel.

Para la realización de este trabajo consistió en cuantificar las características morfométricas de la cuenca de San Gabriel, así como el cambio de uso de suelo en el periodo 2014-2022. Con el análisis morfométrico se delinearon 12 subcuencas con alturas máximas de 2651 msnm a 1298 msnm, con pendientes máximas de hasta 63° en la porción suroriental y noroccidental, con valores de Índice de Gravelius (K_G) de 1.57 hasta 2.93. Estos valores permiten separar las subcuencas en dos grupos principales: aquellas con una forma más circular y de mayor superficie como son las subcuencas 4, 7, 9 y 11, cuyas características apuntan a un mayor aporte de agua durante eventos de lluvia y aquellas subcuencas con forma alargada y un cambio de pendiente mayor, como las subcuencas 3, 8 y 10, asociadas a un aporte rápido de agua al canal principal, pero en diferentes puntos, lo que resulta en una descarga total más baja.

Posteriormente, el análisis espacio-temporal del cambio de uso de suelo para el periodo de 2014-2022 en las 12 subcuencas que alimentan el río Salsipuedes, permitió identificar las subcuencas que a lo largo de este periodo de tiempo han sufrido un cambio importante en la cobertura, y por ende una mayor susceptibilidad a procesos de erosión, entre ellas destacan las subcuencas 4, 6, 7 y 8 con evidente cambio de vegetación natural a cultivo de aguacate o suelo desnudo; por otro lado las subcuencas 8, 9, 10 y 11 fueron aquellas mayormente afectadas por los incendios, con porcentajes de hasta 90% para la subcuenca 8.

Para cada tipo de suelo se realizó un estudio textural y de contenido de materia orgánica, información necesaria para la definición de la erodibilidad. En particular, los suelos analizados corresponden a andosoles, asociados a procesos pedogenéticos en depósitos volcánicos del volcán Cántaro, texturalmente franco-arenosos, con contenido de arcillas hasta del 20%. Integrando las características morfométricas para la obtención del parámetro LS, con el tipo de cobertura y las características texturales de los suelos para el parámetro C, se obtuvo el mapa de erosión para la cuenca de San Gabriel para el año 2022, así como después de los incendios del 2019. Este análisis muestra cómo las subcuencas en la porción occidental y norte son las que presentan un mayor potencial a procesos erosivos y como después de los incendios del 2019, este aumenta drásticamente en promedio en un 61% para las subcuencas 7, 8, 9, 10 y 11. Aun cuando las subcuencas como la 10 y 11 han sufrido en el periodo 2014-2022 un mínimo cambio de uso de suelo manteniendo una cobertura natural, pero al ser afectadas por los incendios se vuelven más susceptibles a la erosión. Sin embargo, es importante mencionar que el cambio en la permeabilidad de la superficie a causa de incendios, debido a la presencia de ceniza, además de la destrucción de raíces y materia orgánica, es un proceso transitorio. A distancia de 3 años desde el evento, las subcuencas afectadas ya han recuperado parte de la vegetación natural y la ceniza, y los restos de material quemado ya han sido removilizados o como la subcuenca 8, el área incendiada ya ha sido sustituida por cultivos de aguacate.

A partir de la definición de la susceptibilidad a la erosión de las diferentes subcuencas, para poder definir el potencial de cada una de ellas en la formación de flujos de escombros, se realizó el análisis climático del área de estudio para determinar las características de eventos hidrometeorológicos extremos. Es importante mencionar que el área está pobremente cubierta por estaciones meteorológicas y los datos disponibles son discontinuos, e incluyen únicamente datos del periodo de 1946 a 1991. El único dato de lluvia disponible para el evento del 2 de junio de 2019 se obtuvo de una base de datos de radar que tiene una resolución espacial de 5.5 km, que se demostró ser insuficiente para reproducir el flujo observado, como se discutirá más adelante. Basándose en el análisis de precipitación de la estación de San Gabriel, se definieron períodos de retorno por 5, 10, 15 y 20 años, a nivel anual, mensual, para máximos diarios y acumulados en 3-5 días, característico de lluvias asociadas a eventos extremos durante el paso de huracanes. En específico, se determinó que en el periodo de 3-5 días, una lluvia acumulada de 100 mm se presenta con un periodo de retorno de 5 años, 127-138 mm para 10 y 15 años, y 150 mm para un periodo de 20 años. Este análisis no muestra diferencias importantes por periodos de retorno, comportamiento típico en zonas con climas húmedos poco variables. Para máximos diarios, los niveles de lluvia que se presentan son de 65 mm para un

periodo de retorno de 5 años, 79 mm para 10 años, 85 mm para 15 años y por último una lluvia de 90 mm para un periodo de retorno de 20 años.

Estos umbrales de lluvia fueron analizados para estimar el volumen de agua que cada subcuenca puede aportar al río Salsipuedes y posteriormente evaluar el potencial en la formación de flujos de agua y sedimento y su capacidad de inundación hacia la ciudad de San Gabriel. Para eso, se utilizó el código matemático FLO 2D, el cual permite realizar simulaciones de lluvia-escurrimiento considerando las características hidrológicas de las cuencas y una lluvia estacionaria sobre todo el área. Los parámetros de infiltración por cada subcuenca se estimaron de manera empírica utilizando el Número de Curva, por cada tipo de suelo y cobertura, así como por el grado de afectación por los incendios. Por cada umbral se realizaron simulaciones para los años 2014, 2019 (pre y post incendio) y 2022 para observar cómo el cambio de uso de suelo puede determinar un cambio en la descarga.

Al realizar las simulaciones de lluvia-escurrimiento, se observaron varias limitaciones posiblemente asociadas a la resolución del DEM utilizado, a la incertidumbre en cuanto a la definición del parámetro de permeabilidad y al número de registros, así como a la falta de datos de lluvia más precisos en cuanto a su intensidad, ya que los datos utilizados son acumulados por día. La temporalidad de los eventos de lluvia se definió con base en curvas obtenidas en el Volcán de Colima, para los Huracanes Manuel y Patricia (Capra et al., 2018), para la lluvia de 37 mm, se aproximó a una duración de 1 a 3 horas, característica de eventos extremos observados en el Volcán de Colima (Capra et al., 2010). De acuerdo a los tres escenarios simulados, el valor de 150 mm con periodo de retorno de 20 años fue el único que permitió realizar escenarios para las diferentes subcuencas con base en el cambio de uso de suelo y la condición pre y post incendio para el 2019. Las subcuencas 1, 3, 8 10 y 11 son aquellas que muestran un incremento en el volumen total de la descarga durante el periodo de 2014 al 2022 por el cambio de uso de suelo, es importante mencionar que las subcuencas 1 y 3 son las que reciben el drenaje de las demás subcuencas, por lo que suman los cambios en la descarga de cada una de ellas. Por otro lado, es muy evidente como después del incendio, las subcuencas afectadas muestran un incremento drástico en el volumen de descarga. El valor de 100 mm con periodo de retorno de 5 años solo permitió realizar el escenario post incendio, ya que el pre incendio no generó un escurrimiento importante en las subcuencas. Con la lluvia de 90 mm tampoco se pudieron obtener valores de descarga considerando el parámetro de infiltración, por lo que se consideró solo un Número de Curva global para toda la cuenca.

A pesar de las limitaciones del modelado de lluvia-escorrentamiento para ciertos umbrales de lluvia, con el análisis aquí expuesto, se desprende como la modificación de la cobertura para cambio de vegetación de natural a cultivo o suelo desnudo, además de promover un incremento en el grado de erosión y, por ende, en la disponibilidad de sedimentos, también lleva a un aumento en el aporte de agua superficial debido a una disminución en la capacidad de infiltración. Estos cambios son aún más drásticos después de un incendio y ocasionan que las zonas sean altamente susceptibles a la formación de flujos de escombros durante eventos de lluvia.

Finalmente, de acuerdo con los volúmenes de agua obtenidos con los escenarios de periodos de retorno de 5 años y 20 años y las condiciones de infiltración pre y post incendio, con el código FLO 2D se realizaron simulaciones de flujos de agua y sedimento para su comparación con el evento observado el 2 de junio de 2019. Como antes mencionado, no se cuenta con datos de lluvia registrados durante el evento, por lo que, con las simulaciones se pretendió observar cuales de los escenarios aquí definidos se aproxima más al evento observado. Del flujo del 2 de junio se cuenta únicamente con una imagen satelital Sentinel-2 adquirida el 2 de julio de 2019, observaciones de campo recabadas en el año 2021, así como de imágenes y videos reportados en periódico y noticieros; estas evidencias son las que se utilizaron para definir posibles similitudes. Otro aspecto importante, es que la resolución del DEM no permite reproducir con detalle el drenaje principal del río Salsipuedes, especialmente en la zona urbana en donde el río ya ha sido canalizado.

Al comparar las simulaciones, el flujo de escombros obtenido con el volumen de descarga post incendio para una lluvia de 150 mm, es el que se aproxima mejor a lo observado en cuanto a la profundidad del flujo con valores de hasta 4 metros en la zona urbana, respecto a los 6 metros estimado para el evento. En cuanto al área total de inundación, los escenarios sobreestiman lo observado, esto debido a la baja resolución del DEM, aun disminuyendo el tamaño de la malla computacional este efecto no disminuye. Mientras que el escenario que mejor se aproxima al área de inundación registrada en la imagen Sentinel-2 es el de 90 mm.

Capítulo 7: Conclusiones

- Cambios en el uso de suelo a favor de cultivos disminuyen la capacidad de infiltración e incrementan la erosión, por lo que favorecen la formación de flujos de escombros durante eventos hidrometeorológicos extremos.
- Estas condiciones se incrementan notablemente después de un incendio, haciendo todavía más susceptible la cuenca a la ocurrencia de eventos con estas características.
- Los cambios que sufre el suelo post incendio son transitorios y dependiendo de las condiciones climáticas, la cubierta vegetal se puede recuperar rápidamente, sin embargo, estas zonas afectadas por los incendios son retomadas para su uso agrícola, por lo que siguen siendo susceptibles.
- El evento del 2 de junio de 2019, aun cuando no se cuenta con datos directos de la precipitación, su magnitud fue probablemente relacionada directamente a los cambios provocados en las subcuencas en el sector suroriental después del incendio.
- Este análisis permitió definir aquellas subcuencas que, durante los últimos 8 años, por cambio de uso de suelo, son más susceptibles a procesos de erosión (subcuencas 4, 6, 7, 8).
- De acuerdo a los resultados de las simulaciones lluvia-escurrimiento, las subcuencas 1, 3, 8 10 y 11 son aquellas que muestran un incremento en el volumen total de la descarga durante el periodo de 2014 al 2022 asociado al cambio de uso de suelo.
- El escenario post incendio es el que se aproxima mejor a las evidencias en campo en cuanto a las profundidades del flujo, capacidad en dañar infraestructuras importantes, así como caminos, carreteras y puentes.
- Se sugiere medidas de mitigación como: planes de reforestación adecuada, es decir, utilizar vegetación característica de la zona de estudio. La construcción de barreras o diques que sean capaces de disminuir la velocidad y confinar los flujos de escombros, y así disminuir o limitar los daños en la población de San Gabriel durante la temporada de lluvia.
- A pesar de la resolución del DEM con el que se trabajó (12.5 m), esta investigación podrá servir como base para posteriores trabajos que se realicen, pero con una mayor resolución de la zona de interés.
- De acuerdo al análisis de lluvia histórica, eventos de 90 mm, 100 mm y 150 mm tienen un periodo de retorno de 5 y 20 años respectivamente, por lo que las medidas de mitigación propuestas deben contemplar estos lapsos de tiempo.

Referencias

- Alaska Satellite Facility, ALOS PALSAR. DEM 12.5 m. Recuperado de www.asf.alaska.edu
- Alcántara, I. y Murillo, F. (2007). Procesos de remoción en masa en México: hacia una propuesta de elaboración de un inventario nacional. Investigaciones geográficas, boletín del Instituto de Geografía, UNAM. ISSN 0188-4611, núm. 66, 2008, pp.47-64.
- Álvarez, Y. (2015). Relación entre los deslizamientos y cambios en la cubierta de uso de suelo y vegetación entre los años 1983 y 2014 en el arroyo la Ciénega, volcán Nevado de Toluca, México. Tesis para obtener el título de Bióloga, Facultad de ciencias, UNAM.
- Bakker, M., Govers, G., Van Doorn, A., Quetier, F., Chovardas, D. & Rounsevell, M. (2008). The response of soil erosion and sediment export land-use change in four areas of Europe: The importance of landscape pattern. *Geomorphology* 98, 2013-226.
- Bardou, E., Boivini, P. & Pfeifer, H. (2007). Properties of debris Flow deposits and source materials compared: implications for debris flow characterization. *Sedimentology*, 54, 469-480. doi: 10.1111/j.1365-3091.2007.00855.x
- Borselli, L. (2004,2018). Global Soil Erodibility Database Query KUERY 1.5, Win 64bit edition.
- Borselli, L., Cassi, P. & Torri, D. (2008). Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment. *CATENA*, Volume 75 (3), pages 268-277, ISSN 0341-8162. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.07.006>
- Borselli, L., Torri, D., Poesen, J. & laquinta, P. (2012). A robust algorithm for estimating soil erodibility in different climates. *CATENA*, Volume 97, p. 85-94. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.05.012>
- Caballero, L. (2012). Dinámica de flujo de escombros: Nuevas evidencias a partir de datos experimentales, Tesis que para obtener el grado de Doctora en Ciencias. Instituto de Geología, UNAM.
- Caballero, L. and Capra, L. (2014). The use of FLO 2D numerical code in lahar hazard evaluation at Popocatepetl volcano: a 2001 lahar scenario. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14 (12), 3345-3355. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-3345-2014>
- Cabrera, Y. (2019). Transformaciones patogenéticas por efecto del uso de suelo en sistemas cultivados por caña en la región de Córdoba, Veracruz. Tesis de Maestría en Ciencias de la Tierra, UNAM.

- Capra, L., Borselli, L., Varley, N., Gavilanes, J., Norini, G., Sarocchi, D., Caballero, L. & Cortes, A. (2010). Rainfall-triggered lahars at Volcan de Colima, México: Surface hydro-repellency as initiation process. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.10.014>
- Capra, L., Coviello, V., Borselli, L., Márquez -Ramírez, V., Arámbula- Mendoza, R. (2018). Hydrological control of large hurricane-induced lahars: evidence from rainfall-runoff modeling seismic and video monitoring. *Natural Hazards and Earth System Sciences*.
- Casabella-González, M., Borselli, L. & García-Meza, J. (2021). Soil Horizon erodibility assessment in an area of Mexico susceptible to gully erosion. *Journal of South American Earth Sciences*, Volume 111, 103497, ISSN 0895-9811. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103497>
- Cervantes, V. (2019). Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica, en bienes comunales de San Mateo Mimiapan, Puebla. Tesis de licenciatura en Biología. UNAM.
- Comisión Estatal del Agua, Jalisco. (2015). Ficha Técnica Hidrológica del Municipio de San Gabriel.
- CONAGUA. Comisión Nacional del Agua. (2020). Red de estaciones climatológicas.
- Costa, J, E. 1987. Rheologic, Geomorphic and Sedimentologic Differentiation of Water Floods, Hyperconcentrated Flows and debris flow. In Baker-V, Kocher-R, Patton-P, Flood Geomorphology.
- Diaz-Carvajal, A., Mercado-Fernández. (2017). Determinación del número de curva en la subcuenca de Betancí, Colombia mediante teledetección y SIG. Universidad de Córdoba, Colombia. *Ingeniería y Desarrollo*. Vol.35, núm. 2:452-470.
- Follmi, D., Baartman, J., Benali, A. and Nunes, J.P. (2022). How do large wildfires impact sediment redistribution over multiple decades? *Earth Surface Processes and Landforms*,1–18. <https://doi.org/10.1002/esp.5441>
- Fuentes, J. (2004). Análisis morfométrico de cuencas: caso de estudio del Parque Nacional Pico de Tancítaro. Dirección General de Investigación de Ordenamiento Ecológico y Conservación de Ecosistemas. Instituto Nacional de Ecología, pp 47.
- Gámez- Balmaceda, E; López-Ramos, A; Martínez-Acosta L; Medrano-Barbosa J; Remolina-López, J; Seingier, G; Daesslé, L; López-Lambraño, A. (2020). Rainfall Intensity-Duration-Frequency Relationship. Case Study: Depth- duration ratio in a Semi-Arid Zone in Mexico. *Hydrology*, 7, 78.

- Hawkins, R. (1978). Runoff curve numbers with varying site moisture. *Journal of Irrigation and Drainage Division*, 104 pp. 389-398. <https://doi.org/10.1061/jrcea4.0001313>
- INEGI (2013), Conjunto de datos vectoriales 1: 50 000. Cartas 14, Jalisco.
- Iverson, R., Reid, M. and LaHusen, R. (1997). Debris-flow mobilization from landslides. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 25, 85-138.
- Jakob, M. y Hungr, O. (2005). *Debris-flow hazard and Related Phenomena*. Springer Verlag.
- Lavigne, F. and Thouret, J. (2002). Sediment transportation and deposition by rain-triggered lahars at Merapi Volcano, Central Java, Indonesia. *Geomorphology* 49. Elsevier., pp. 45-69.
- López-Lambraño, A. (2001). Elaboración de las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia de la lluvia en las Estaciones pluviográficas Aeropuerto los Garzones, Universidad de Córdoba y Turipana, localizadas en la cuenca Media del Río Sinú, Montería. Universidad Pontificia Bolivariana: Montería, CO, USA.
- Manual de Técnicas de Laboratorio. Laboratorio de Edafología. Centro de Geociencias, UNAM.
- Mead, S., Magill, C. and Hilton, J. (2016). Rain-triggered lahar susceptibility using a shallow landslide and surface erosion model. *Geomorphology* 273, 168-177. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.08.022>
- Moreno, S. (2019). Estudio de los procesos de erosión y remoción en masa en relieves volcánicos y su relación con el uso del suelo. Tesis de Maestría en Ciencias de la Tierra. UNAM.
- NOM-021-SEMARNAT-2000. Diario Oficial de diciembre de 2002.
- O'Brien, J., (2009). Reference Manual, FLO-2D.
- Ortiz-Rodríguez, A. (2017). Flow connectivity in active volcanic areas: Use of index of connectivity in the assessment of lateral flow contribution to main streams. *Catena* 157, 90-111. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2017.05.009>
- Ortiz-Rodríguez, A., Muñoz-Robles, C. & Borselli, L. (2018). Changes in connectivity and hydrological efficiency following wildland fires in Sierra Madre Oriental, Mexico. *Elsevier. Science of the Total Environment* 665, 112-128 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.236>
- Pérez-Salinas, J. E., Rufino-Rodríguez, F., López-Santos, A., Torres-González, J., Meraz-Jiménez, A., Díaz-Romo, A. y Valdivia-Martínez, O. (2019). Erodabilidad y riesgo de erosión de suelos

negros del centro de México: estudio de un Phaozem. *Revista Terra Latinoamericana* 37, 391-400. <https://doi.org/10.28940/terra.v37i4.531>

- Pierson, T.C. and Scott, K.M., (1985). Downstream dilution of a lahar: transition from debris flow to hyperconcentrated streamflow. *Water Resource Research*, 21 (10), 1511-1524. <https://doi.org/10.1029/wr021i010p01511>
- Porta Casanellas, J., López-Acevedo, M., Roquero de Laburu, C. (1994). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Madrid, España: Mundi-Prensa.
- Rahmawati, N., Rahayu, K. & Yuliasari, S. (2021). Performance of daily satellite-based rainfall in groundwater basin of Merapi Aquifer System, Yogyakarta. *Theoretical and Applied Climatology* 146, 173–190. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03731-9>
- Ramírez. O., F.A.; Hincapié G. E.; Sadeghian K., S. (2009). Erodabilidad de los suelos de la zona central cafetera del departamento de Caldas. *Cenicafé* 60(1) 58-71.
- Reis, M., Gómez, E., Rodríguez, A. & Alves, M. (2001). Effects of soil management systems on soil microbial activity, bulk density and chemical properties. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, Brasilia, 36 (12), p. 1523-1545.
- Rodríguez, E., Mora, G., Murrieta, H. (2006). Flujos de baja concentración asociados con lluvias de intensidad extraordinaria en el flanco sur del volcán Pico de Orizaba, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. Número especial de Geología urbana, núm. 2, p. 223-236.
- Sarocchi, D. (2006). Análisis textural del depósito de flujo de bloques y ceniza del 17 de julio de 1999 en el volcán de Colima. Tesis de Doctorado en Ciencias, Vulcanología. UNAM.
- Takahashi, T., (2009). A review of Japanese debris flow research. *International Journal of Erosion Control Engineering*, Vol. 2 (1), 1-14. <https://doi.org/10.13101/ijece.2.1>
- Tranquilino, C. (2020). Dinámica de flujos de escombros a través de datos experimentales. Tesis para obtener el título de Licenciatura en Ciencias de la Tierra. UNAM.
- Vázquez, R., Capra, L., Caballero, L., Arámbula-Mendoza, R. & Reyes-Dávila, G. (2014). The anatomy of a lahar: Deciphering the 15th September 2012 lahar at Volcan de Colima, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 272,126-136. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2013.11.013>
- Vallance, J. W. (2000). Lahars. *Encyclopedia of volcanoes*. Academic press.

- Villegas-Soto, M., Aguilera-Herrera, N., Flores-Delgadillo, L., (1978). Método Simplificado de análisis para la clasificación granulométrica de los minerales del suelo. Instituto de Geología, Revista, vol. 2, núm. 2, p. 188-193.
- Wieczorek, G., y Glade, T. (2005). Climatic factors influencing occurrence of debris flows. Debris-flow and Related Phenomena.