

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE QUÍMICA

**“DETERMINACIÓN DE PELIGRO DE INUNDACIÓN ANTE
EVENTOS EXTRAORDINARIOS EN LA REGIÓN
HIDROLÓGICA N° 29 (RÍO COATZACOALCOS)”**

TESIS COLECTIVA

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO AMBIENTAL

PRESENTAN

ALEJANDRA LUCAS GARCÍA

DIEGO BALTAZAR VILLANUEVA

DIRIGIDA POR

M. en C. MARÍA ALEJANDRINA LETICIA MONTES LEÓN

SANTIAGO DE QUERÉTARO, QUERÉTARO A 09 DE SEPTIEMBRE DE 2015.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO



FACULTAD DE QUÍMICA

**“DETERMINACIÓN DE PELIGRO DE
INUNDACIÓN ANTE EVENTOS
EXTRAORDINARIOS EN LA REGIÓN
HIDROLÓGICA N° 29 (RÍO COATZACOALCOS)”.**

TESIS COLECTIVA

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO AMBIENTAL

PRESENTAN

ALEJANDRA LUCAS GARCÍA

DIEGO BALTAZAR VILLANUEVA

DIRIGIDA POR

M. en C. MARÍA ALEJANDRINA LETICIA MONTES LEÓN

SINODALES

**M. en C. MARÍA ALEJANDRINA LETICIA
MONTES LEÓN
DIRECTOR**

**Dr. MIGUEL ÁNGEL RICO RODRÍGUEZ
SINODAL**

**M. en C. MARÍA EUGENIA ORTEGA MORÍN
SINODAL**

**M. en C. RICARDO JAVIER TORRES
HERNÁNDEZ
SINODAL**

ÍNDICE GENERAL

Contenido	Página
ÍNDICE GENERAL	i
ÍNDICE DE FIGURAS	iii
ÍNDICE DE CUADROS	vi
RESUMEN	
1. ANTECEDENTES	1
1.1 Fenómenos hidrometeorológicos	2
1.2 Inundaciones	3
1.3 Impacto de las inundaciones en México y el mundo	14
1.4 Mapas de riesgo por inundaciones	18
1.4.1 Gestión de riesgos	18
1.4.1.1 Clasificación de riesgos	19
1.4.1.2 Cálculo de riesgo	20
1.5 Construcción de mapas por Software	23
1.6 Área de estudio	26
2. OBJETIVO	32
2.1 General	32
2.2 Particular	32
3. METODOLOGÍA	33
3.1 Materiales	33
3.2 Método	33
3.2.1 Recopilación de información bibliográfica de la Región Hidrológica RH29 (Río Coatzacoalcos)	33

3.2.2 Mapa de dirección de flujo de la RH29	34
3.2.3 Mapa de escurrimiento (Q) de la RH29	34
3.2.4 Mapa de escurrimiento acumulado	35
3.2.5 Mapa de Índice de Inundación	36
3.2.6 Calibración de mapa de Índice de Inundación	36
4. RESULTADOS	38
4.1 Recopilación de información	38
4.2 Generación de mapa de dirección de flujo	46
4.3 Generación de mapa de escurrimiento (Q)	47
4.4 Generación de mapa de Flujo acumulado	49
4.5 Generación de mapa de Índice de Inundación	54
4.6 Calibración de mapas de Índice de Inundación	58
5. DISCUSIÓN	66
5.1 Recopilación de información	66
5.2 Mapa de dirección de flujo de la RH N° 29 (Río Coatzacoalcos)	68
5.3 Mapa de escurrimiento de la RH N°29 (Río Coatzacoalcos)	68
5.4 Mapa de escurrimiento acumulado de la RH N°29(Río Coatzacoalcos)	69
5.5 Generación de mapa de Índice de Inundación de la RH N° 29	70
5.6 Calibración de mapas de Índice de Inundación	71
6. CONCLUSIONES	73
7. REFERENCIAS	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Clasificación de las inundaciones de acuerdo a su origen	4
2	Clasificación de la inundación de acuerdo al tiempo de respuesta	4
3	Trayectoria de ciclones tropicales, (1951-1960) en Océano Atlántico	5
4	Trayectoria de ciclones tropicales, (1961-1970) en Océano Atlántico	7
5	Trayectoria de ciclones tropicales, (1971-1980) en Océano Atlántico	7
6	Trayectoria de ciclones tropicales, (1981-1990) en Océano Atlántico	8
7	Trayectoria de ciclones tropicales, (1991-2000) en Océano Atlántico	8
8	Trayectoria de ciclones tropicales, (1951-1960) en Océano Pacífico	9
9	Trayectoria de ciclones tropicales, (1961-1970) en Océano Pacífico	9
10	Trayectoria de ciclones tropicales, (1971-1980) en Océano Pacífico	10
11	Trayectoria de ciclones tropicales, (1981-1990) en Océano Pacífico	10
12	Trayectoria de ciclones tropicales, (1991-2000) en Océano Pacífico	11
13	Índice de riesgos y peligros en grandes ciudades	15
14	Las 8 posibles direcciones que puede tomar el flujo	24
15	Metodología de Índice de Inundación	24
16	Regiones hidrológicas de México	30

17	Fuentes para poder realizar calibraciones confiables: a) modelación matemática, b) imagen de radar, c) imagen satelital, d) fotografía aérea	31
18	Distribución de la precipitación media anual (PMA) en México	38
19	Modelo digital de elevación RH-29	39
20	Edafología (tipo de suelo) de la región hidrológica 29	40
21	Uso de suelo y vegetación en la región hidrológica 29	41
22	Mapa de valor de curva numérica para la rh-29	42
23	Precipitación asociada a un Tr de 2 años	43
24	Precipitación asociada a un Tr de 5 años	44
25	Precipitación asociada a un Tr de 100 años	45
26	Mapa de dirección del flujo para la RH-29	46
27	Escorrentamiento asociada a un tr de 2 años	47
28	Escorrentamiento asociada a un tr de 5 años	48
29	Escorrentamiento asociada a un tr de 100 años	49
30	Mapa de flujo acumulado para un tr de 2 años	50
31	Mapa de flujo acumulado para un tr de 5 años	51
32	Mapa de flujo acumulado para un tr de 100 años	52
33	Red de ríos naturales de la RH-29	53
34	Mapa de pendientes para la RH-29	54
35	Cálculo del Índice de Inundación para un tr de 2 años, sin calibrar	55
36	Cálculo del Índice de Inundación para un tr de 5 años, sin calibrar	56

37	Cálculo del Índice de Inundación para un tr de 100 años, sin calibrar	57
38	Mapa del modelo de Índice de Inundación con tr de 2 años sobre el río Nanchital	58
39	Mapa del modelo de Índice de Inundación con tr de 5 años sobre el río Nanchital	59
40	Mapa del modelo de Índice de Inundación con tr de 100 años sobre el río Nanchital	60
41	Histograma de calibración del Índice de Inundación para un tr de 5 años	61
42	Histograma de calibración del Índice de Inundación para un tr de 100 años	61
43	Análisis de regresión lineal	62
44	Histograma de calibración del Índice de Inundación para un tr de 2 años	62
45	Zonas susceptibles de ser inundadas con una superficie mayor a 20 ha en la rh-29 para un tr de 2 años	63
46	Zonas susceptibles de ser inundadas con una superficie mayor a 20 ha en la rh-29 para un tr de 5 años	64
47	Zonas susceptibles de ser inundadas con una superficie mayor a 20 ha en la rh-29 para un tr de 100 años	65
48	Estados que comprenden la Región Hidrológica No. 29	74
49	Municipios de mayor afectación por evento extraordinario (Tr=100 años)	75

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Escala Saffir-Simpson para ciclones	6
2	Fenómenos naturales que han impactado México de 1900 a 2013	17
3	Resumen de pérdidas por fenómenos ocurridos durante 2007	17
4	Niveles de peligrosidad de riesgo	22
5	Comparación del área inundable respecto a la región hidrológica 29	76

RESUMEN

El aumento poblacional desmedido en las ciudades ha ocasionado innumerables cambios de uso de suelo de los alrededores, muchos de ellos injustificados, incluso de áreas naturales protegidas, provocando alteraciones y ocupando regiones que son susceptibles de daños por desastres naturales, lo cual se ha observado que durante los últimos años han ido aumentando en frecuencia y cantidad, generando la necesidad de predecir y alertar con tiempo a la población. El presente trabajo busca servir como un método de prevención ante las posibles inundaciones originadas en la Región Hidrológica 29 (río Coatzacoalcos), en donde se llevará a cabo la metodología del cálculo del Índice de Inundación y estimar los impactos causados por los eventos extraordinarios en diferentes periodos de retorno.

1. ANTECEDENTES

El tema de inundaciones es sin duda, uno de los más comentados sobre todo cuando éstas se presentan en la zonas donde habitamos. El problema real de ello es que justamente la población no percibe el peligro real al que están expuestos, sino hasta que este representa un daño al patrimonio familiar, institucional y de las diversas órdenes de gobierno.

Aunado a lo anterior existe la problemática del ordenamiento territorial, y que muchos desarrollos de todos los niveles, han ido modificando los usos de suelo, es decir lo que antes era un suelo con aptitudes agrícolas o de pastoreo, ahora es un desarrollo habitacional, y magnificando el problema en muchos lugares los gobiernos han ido cediendo zonas naturales y protegidas para desarrollo de infraestructura, modificando así el curso normal de algunos cauces o arroyos, o en el peor de los casos desapareciendo las zonas naturales de regulación que como su nombre lo indica cuando se presenta un escurrimiento alto está zona almacena cierto volumen del mismo evitando un daño mayor en las partes bajas.

Actualmente no existe un mapa de inundación en el cual se pueda observar el peligro al que está expuesta cierta zona, pues los mapas actuales solamente están contruidos en base a las declaratorias de emergencias que se emiten, y éstas tienen como unidad de emisión el municipio, entonces en el mapa el municipio que mayor declaratorias ha tenido, se considera el más expuesto, a pesar de muchos municipios que se inundan no solicitan la emisión de la declaratoria porque en su momento tienen el fondo económico necesario para hace frente al daño, lo anterior hace que el mapa presente un sesgo al no considerar todos los eventos, además de que la unidad municipio es muy amplia en cuanto a su superficie para muchos de los casos.

Es así que nace la idea de mostrar la metodología de Índice de Inundación para generar un mapa de inundación detallado, en el cual si bien es cierto se considera como unidad de estudio la región hidrológica, el detalle realmente se obtiene al utilizar un modelo digital de elevaciones (MDE) con una buena resolución, en el mercado se encuentran diversos MDE disponibles, pero se optó por el que mejor

representó la zona cuando el resultado es calibrado, para dar así una mayor confiabilidad a los resultados.

1.1 Fenómenos Hidrometeorológicos.

Los fenómenos naturales así como los desastres naturales han generado a lo largo de la historia un interés común en su estudio, esto se debe principalmente a la magnitud que ambos pueden llegar a tener y a los efectos que pueden causar a una población; sin embargo es fundamental conocer la diferencia entre ambos, pues esto asegurará la comprensión de un tema tan importante como lo son los eventos extraordinarios.

Los desastres naturales se definen como el resultado de la ocurrencia de uno o más agentes perturbadores severos y extremos, concatenados o no, de origen natural o de la actividad humana, que cuando acontecen en un tiempo y en una zona determinada, causan daños y que por su magnitud exceden la capacidad de respuesta de la comunidad afectada (Ley General de Protección Civil, 2012).

Por otro lado, los fenómenos naturales se definen como toda manifestación de la naturaleza que es producto de su funcionamiento (Sepúlveda, 2008) y se clasifican en tres rubros, los cuales son de origen geológico, meteorológico e hidrológico, estos dos últimos se pueden asociar para formar los fenómenos hidrometeorológicos (Mata, 2000).

Los fenómenos geológicos se caracterizan por tener como causa directa las acciones y movimientos de la corteza terrestre entre los que se encuentran las erupciones volcánicas, inestabilidad de laderas, derrumbes, hundimientos, agrietamientos, etc., mientras que los meteorológicos son reconocidos por los cambios o procesos que ocurren en la atmósfera como lo son tornados, tolvánicas, tubas, reventones, así como demás vórtices. (Ley General de Protección Civil, 2012).

Por otro lado, de acuerdo a la Ley General de Protección Civil, en el Capítulo I, artículo 2, los Fenómenos Hidrometeorológicos son definidos como aquellos agentes

perturbadores que se generan por la acción de los agentes atmosféricos tales como: ciclones tropicales, lluvias extremas, inundaciones pluviales, fluviales, costeras y lacustres; tormentas de nieve, granizo, polvo y electricidad; heladas, sequías, ondas cálidas y gélidas y tornados marinos. (Ley General de Protección Civil, 2012).

1.2 Inundaciones

El fenómeno hidrometeorológico que se estudia en el presente trabajo es el referente a inundaciones, y de acuerdo con CENAPRED, 2004, una inundación se define como: "aquel evento que debido a la precipitación, oleaje, marea de tormenta, o falla de estructura hidráulica provoca un incremento en el nivel de la superficie libre del agua de los ríos o el mar mismo, generando una invasión o penetración de agua en sitios donde usualmente no la hay y generando daños en la población, agricultura, ganadería e infraestructura".

Las inundaciones se pueden clasificar básicamente de acuerdo a dos características su origen y su tiempo de respuesta.

En cuanto a su origen, su clasificación depende de cómo se origina, en la Figura 1, se muestra esta clasificación, y en lo que respecta al tiempo de respuesta este dependerá de la respuesta hidrológica de la cuenca (Figura 2).

De acuerdo al origen de la inundación se define lo siguiente:

Inundación pluvial, son consecuencia de la precipitación, se presentan cuando el terreno se ha saturado y el agua de lluvia excedente comienza a acumularse, pudiendo permanecer horas o días. Su principal característica es que el agua acumulada es agua precipitada sobre esa zona y no la que viene de alguna otra parte (por ejemplo de la parte alta de la cuenca). (CENAPRED, 2004).

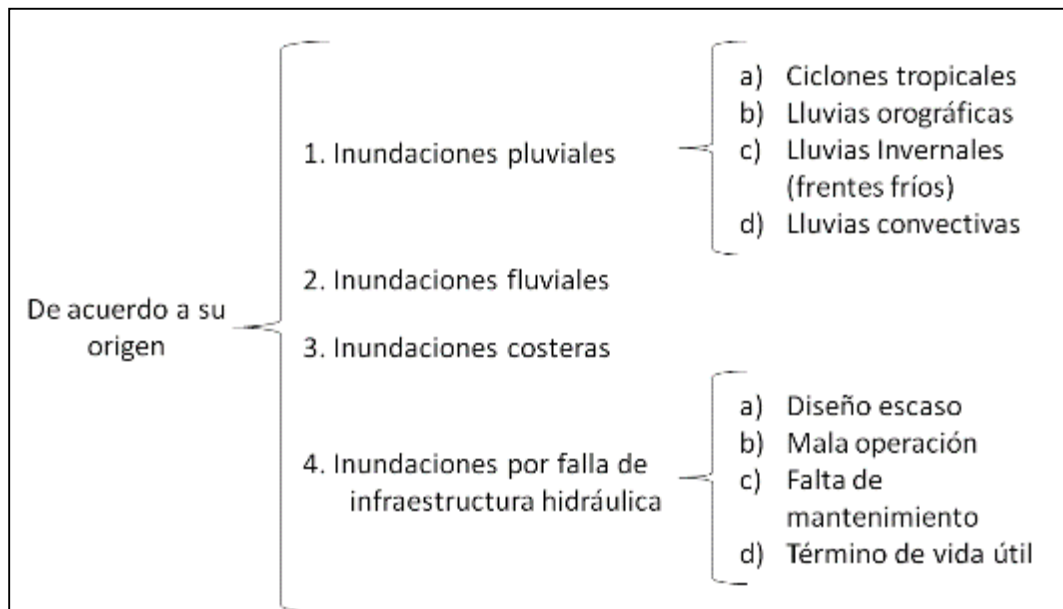


Figura 1. Clasificación de las inundaciones de acuerdo a su origen.

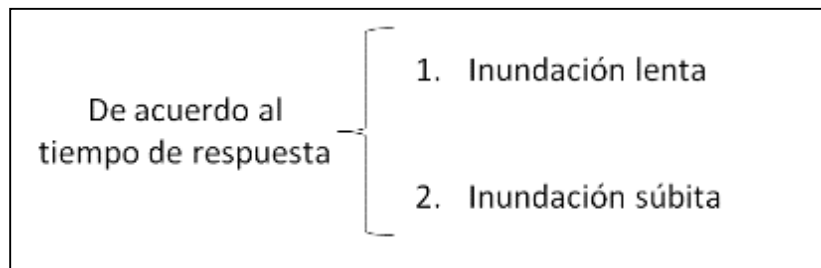


Figura 2. Clasificación de la inundación de acuerdo al tiempo de respuesta.

La precipitación que se hace mención puede presentarse de formas diversas tales como:

a) Ciclones tropicales

Al transportar grandes cantidades de humedad, los ciclones tropicales pueden provocar tormentas de larga duración, del orden de varios días y abarcar grandes extensiones. Por lo que pueden ser causa de inundaciones en las principales cuencas del país, principalmente en aquellas que vierten hacia el golfo de México o hacia el océano Pacífico. La clasificación más utilizada a nivel mundial para los

ciclones es la Saffir-Simpson y sus características se muestran en la Cuadro 1. (CENAPRED, 2013).

La temporada de ciclones, estadísticamente hablando para México, es del 15 de mayo al 30 de noviembre en el océano Pacífico noreste y del 1° de junio al 30 de noviembre en el Atlántico.

En la Figura 3 a la Figura 12 se muestran las trayectorias que han seguido a lo largo de los años los ciclones tropicales en México para el Océano Atlántico como el Pacífico en un periodo de 1951-2000 (CENAPRED, 2002).

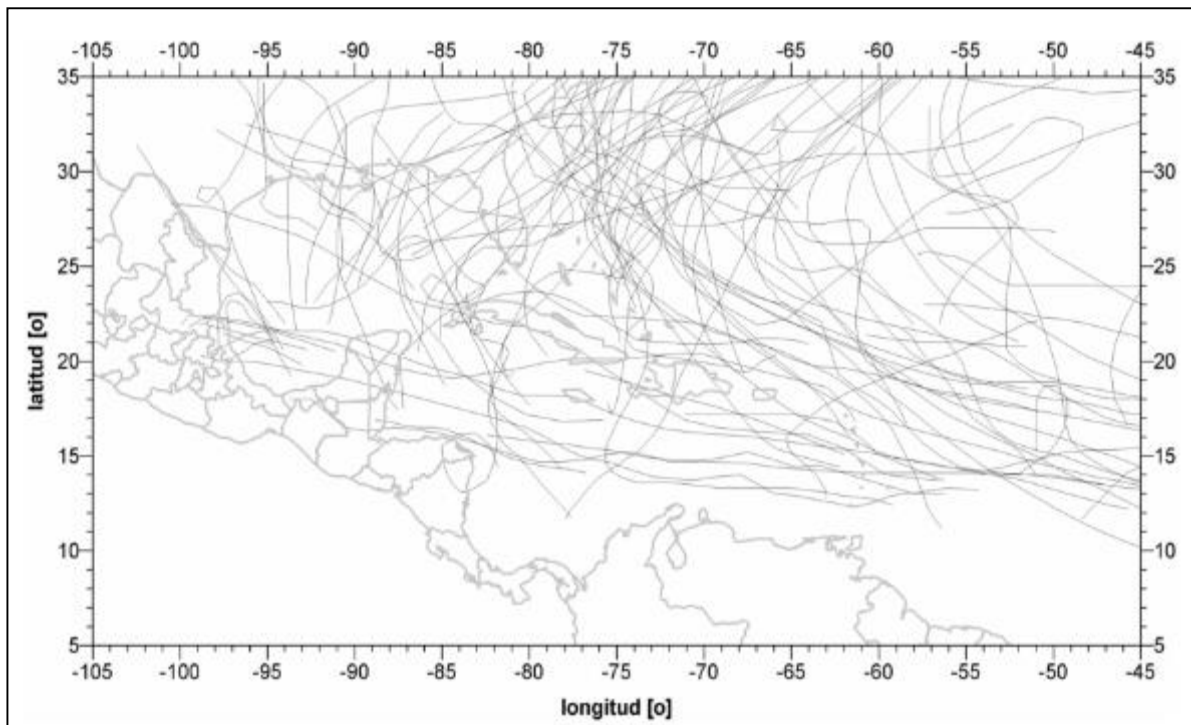


Figura 3. Trayectoria de ciclones tropicales, (1951-1960) en Océano Atlántico

Cuadro 1. Escala Saffir-Simpson para ciclones

Categoría	Presión central (mb)	Vientos (km/h)	Marea de tormenta (m)	Características de los posibles daños materiales e inundaciones
Perturbación tropical	1008.1 a 1010	---	---	Ligera circulación de vientos
Depresión tropical	1004.1 a 1008	< 62	---	Localmente destructivo
Tormenta tropical	985.1 a 1004	62.1 a 118	1.1	Tiene efectos destructivos
Huracán categoría 1	980.1 a 985	118.1 a 154	1.5	Potencial Mínimo. Ningún daño efectivo a los edificios. Daños principalmente a casas rodantes no ancladas, arbustos, follaje y árboles. Ciertos daños a señales pobremente construidas. Algunas inundaciones de carreteras costeras en sus zonas más bajas y daños leves en los muelles. Ciertas embarcaciones pequeñas son arrancadas de sus amarres en fondeaderos expuestos.
Huracán categoría 2	965.1 a 980	154.1 a 178	2.0 a 2.5	Potencial Moderado. Daños considerables a arbustos y a follaje de árboles, inclusive, algunos de ellos son derribados. Daño extenso a señales pobremente construidas. Ciertos daños en los techos de casas, puertas y ventanas. Daño grave a casas rodantes. Carreteras costeras inundadas de 2 a 4 h antes de la entrada del centro del huracán. Daño considerable a muelles, inundación de marinas. Las pequeñas embarcaciones en fondeaderos sin protección rompen amarres. Evacuación de residentes que viven en la línea de costa.
Huracán categoría 3	945.1 a 965	178.1 a 210	2.5 a 4.0	Potencial Extensivo. Follaje arrancado de los árboles; árboles altos derribados. Destrucción de prácticamente todas las señales pobremente construidas. Ciertos daños en los techos de casas, puertas y ventanas. Algunos daños estructurales en pequeñas residencias. Destrucción de casas rodantes. Las inundaciones cerca de la costa destruyen las estructuras más pequeñas; los escombros flotantes y el embate de las olas dañan a las estructuras mayores cercanas a la costa. Los terrenos planos sobre 1.5 m del nivel del mar, pueden resultar inundados hasta 13 km tierra adentro (o más) desde la costa.
Huracán categoría 4	920.1 a 945	210.1 a 250	4.0 a 5.5	Potencial Extremo. Arbustos y árboles derribados; todas las señales destruidas. Daños severos. Daño extenso a los techos de casas, puertas y ventanas. Falla total de techos en residencias pequeñas. Destrucción completa de casas móviles. Terrenos de planicie a 3 m sobre el nivel del mar pueden inundarse hasta 10 km tierra adentro de la costa. Grave daño a la planta baja de estructuras cercanas a la costa por inundación, embate de las olas y escombros flotantes. Erosión importante de las playas.
Huracán categoría 5	< 920	> 250	> 5.5	Potencial Catastrófico. Derribamiento de arbustos y árboles, caída total de señales. Daño muy severo y extenso en ventanas y puertas. Falla total de techos en muchas residencias y edificios industriales. Vidrios hechos añicos de manera extensiva en ventanas y puertas. Algunas edificaciones con falla total. Pequeñas edificaciones derribadas o volcadas Destrucción completa de casas móviles. Daños graves en plantas bajas de todas las estructuras situadas a menos de 4.6 m por encima del nivel del mar y a una distancia de hasta 460 m de la costa.

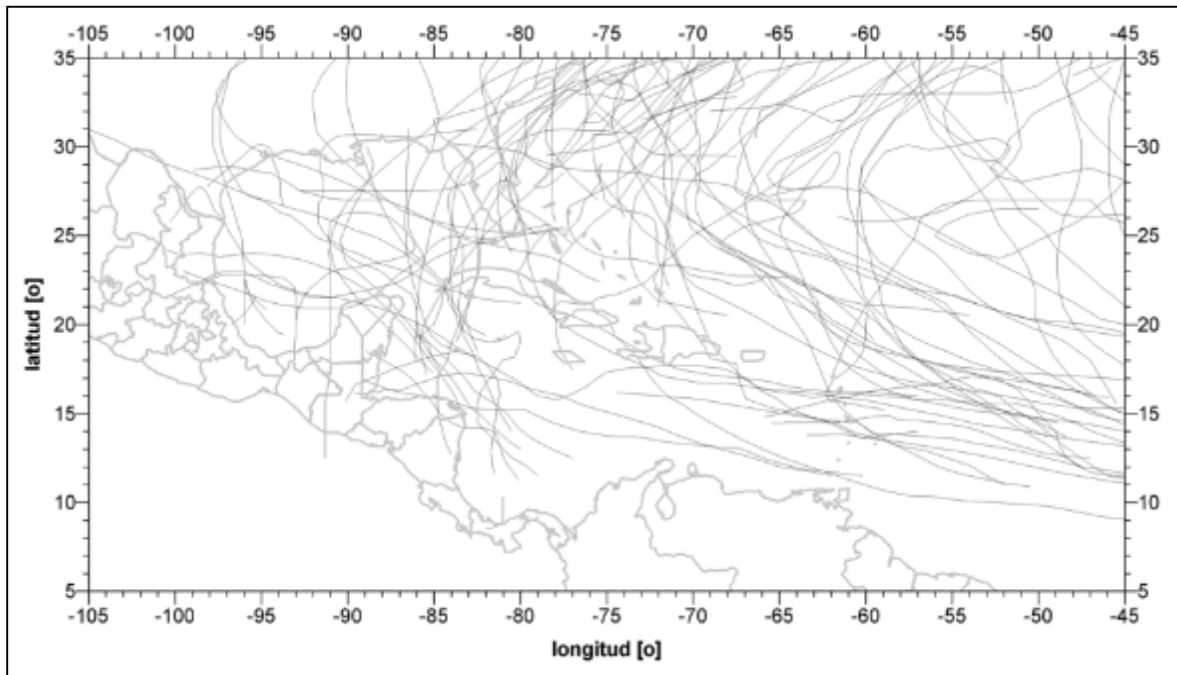


Figura 4. Trayectoria de ciclones tropicales, (1961-1970) en Océano Atlántico

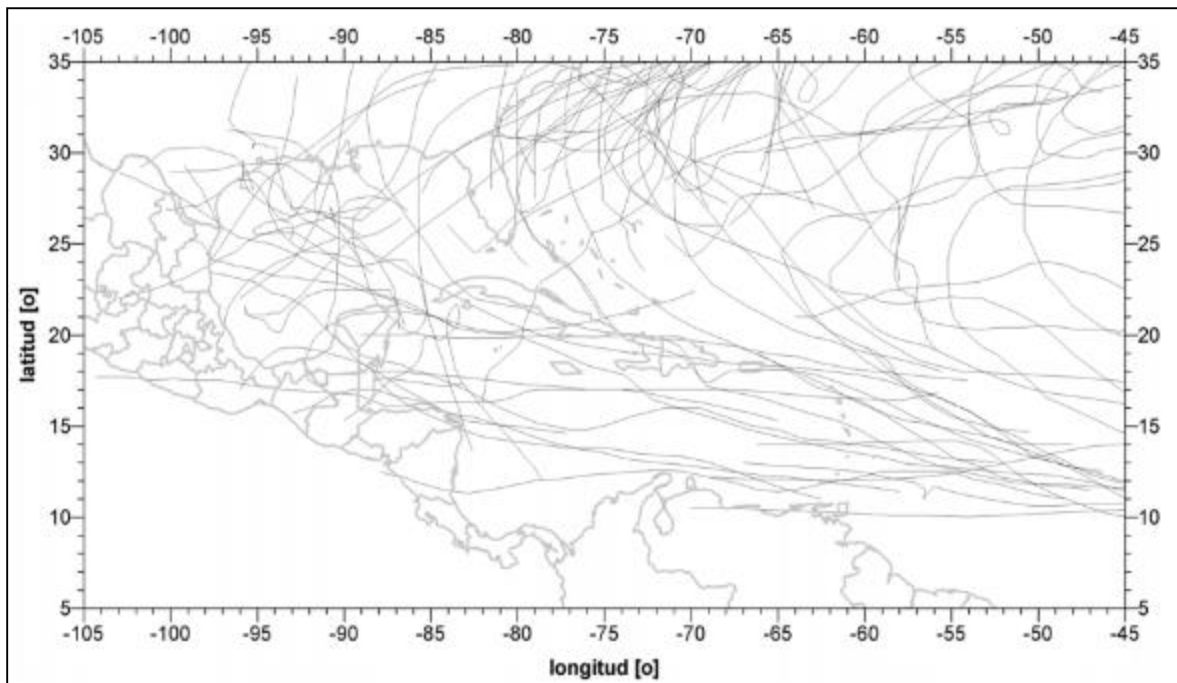


Figura 5. Trayectoria de ciclones tropicales, (1971-1980) en Océano Atlántico

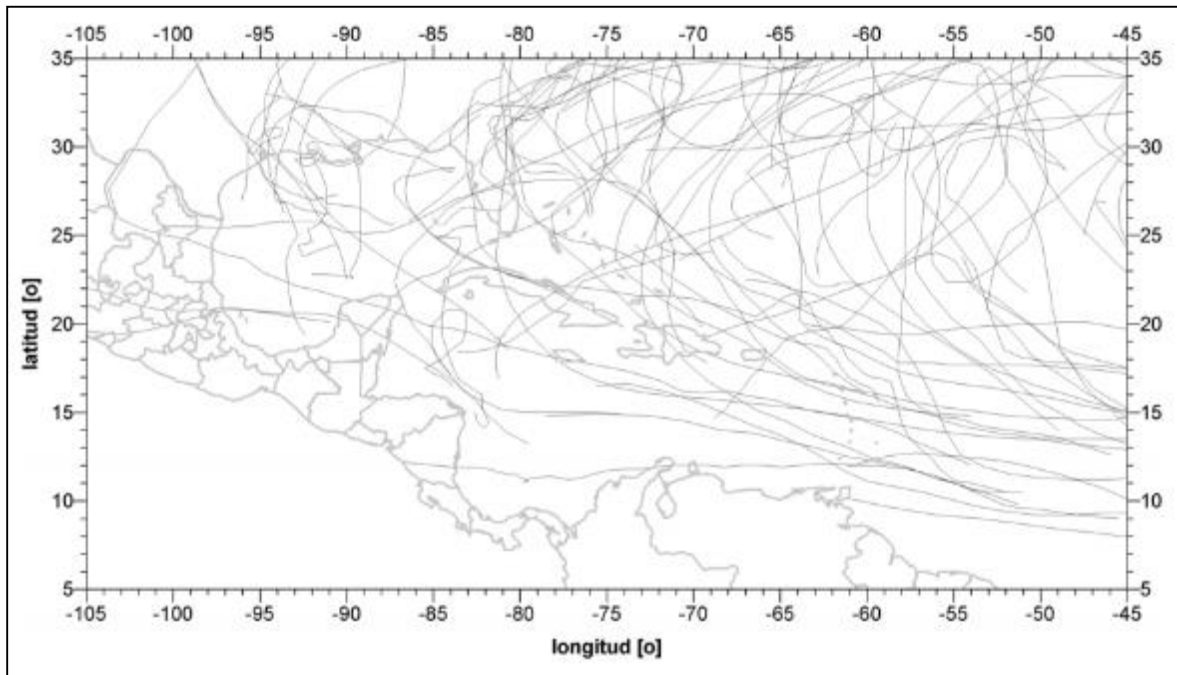


Figura 6. Trayectoria de ciclones tropicales, (1981-1990) en Océano Atlántico

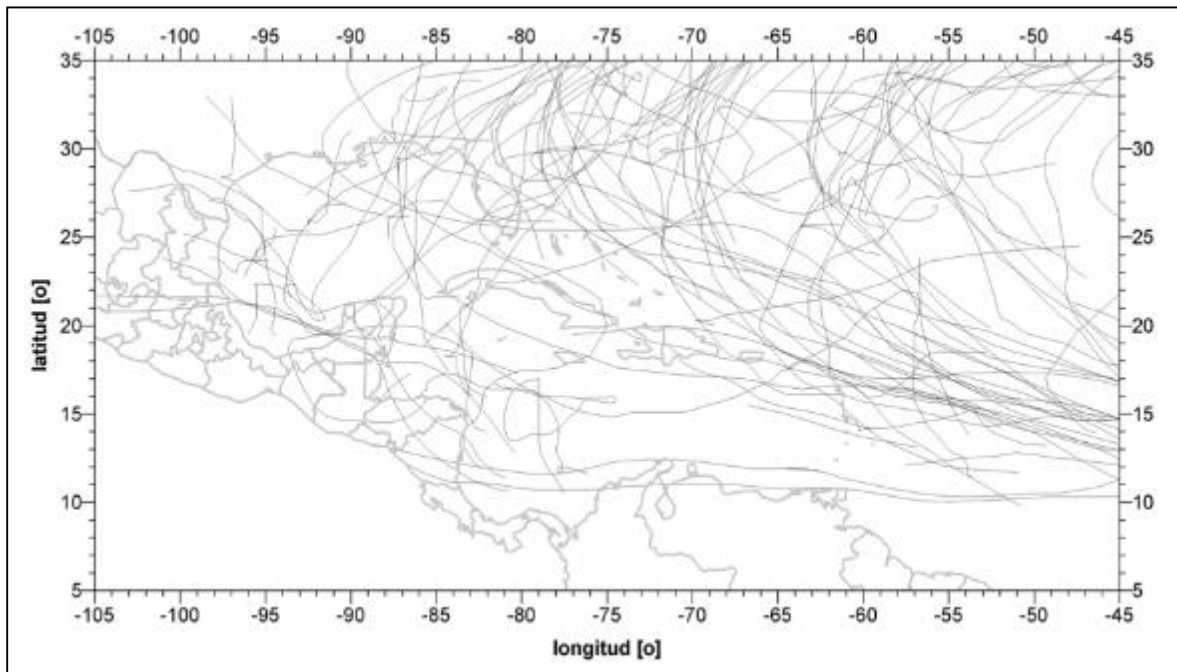


Figura 7. Trayectoria de ciclones tropicales, (1991-2000) en Océano Atlántico

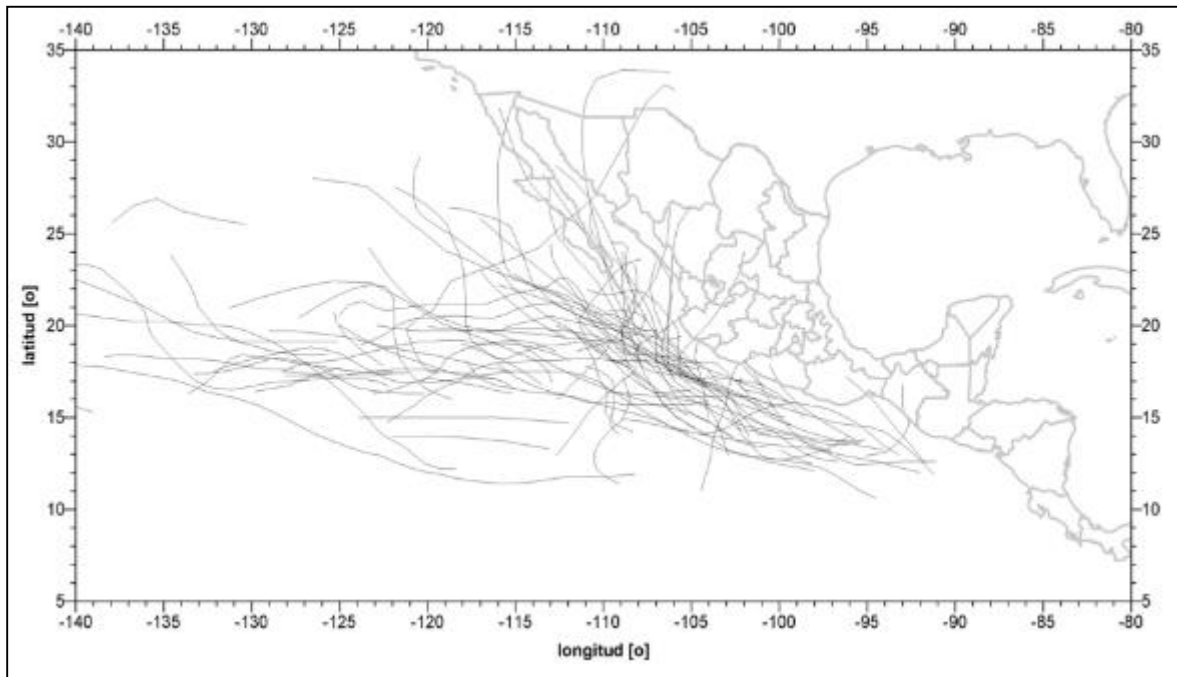


Figura 8. Trayectoria de ciclones tropicales, (1951-1960) en Océano Pacífico

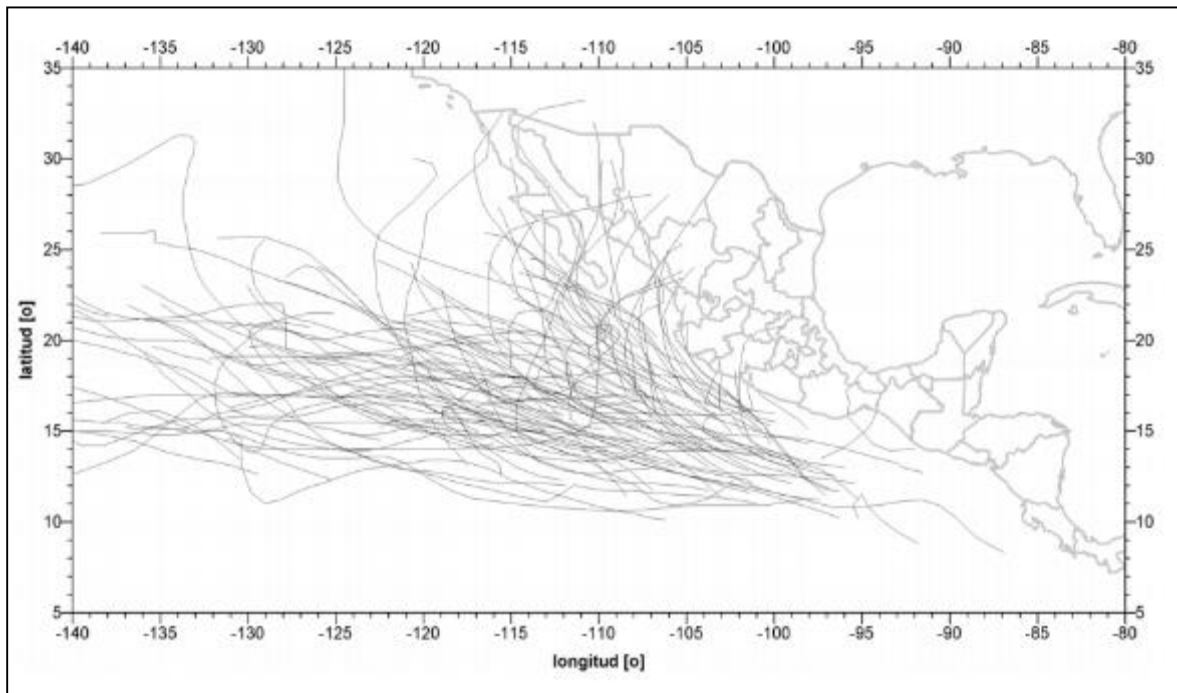


Figura 9. Trayectoria de ciclones tropicales, (1961-1970) en Océano Pacífico

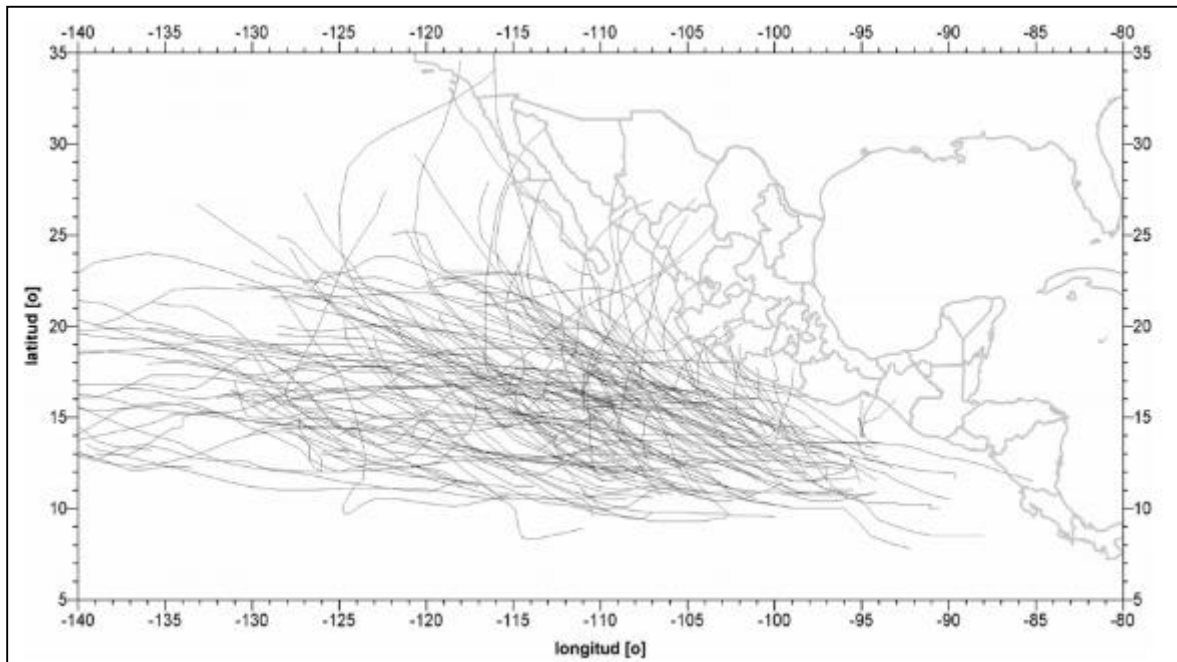


Figura 10. Trayectoria de ciclones tropicales, (1971-1980) en Océano Pacifico

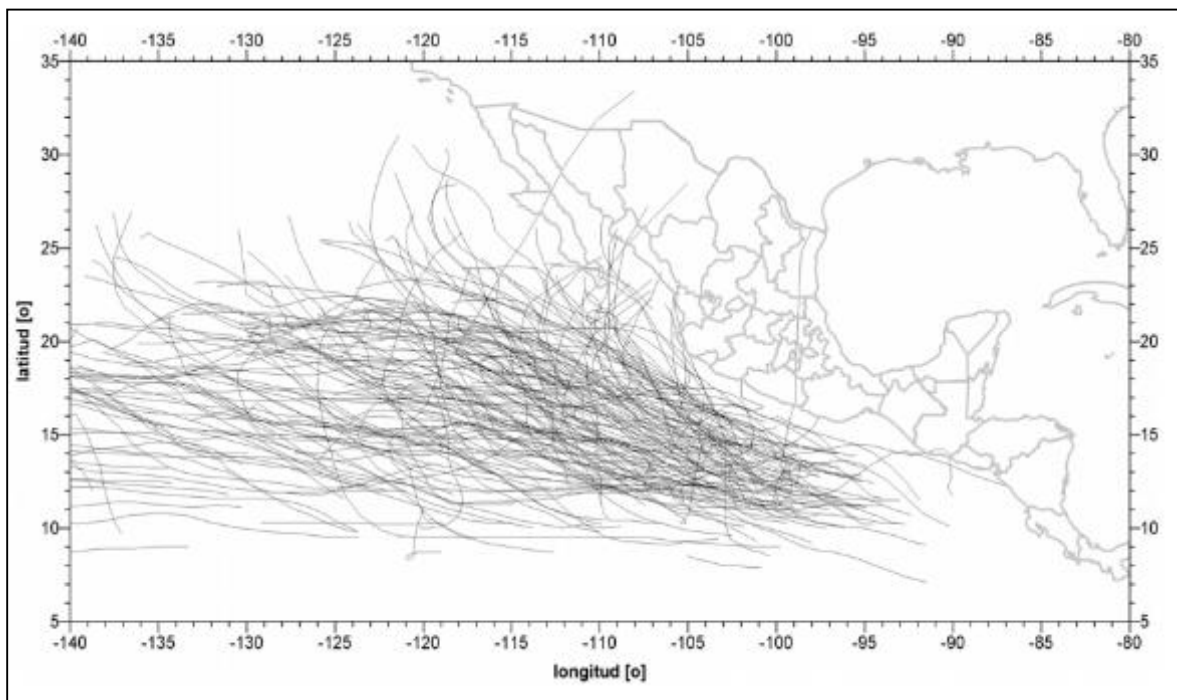


Figura 11. Trayectoria de ciclones tropicales, (1981-1990) en Océano Pacifico

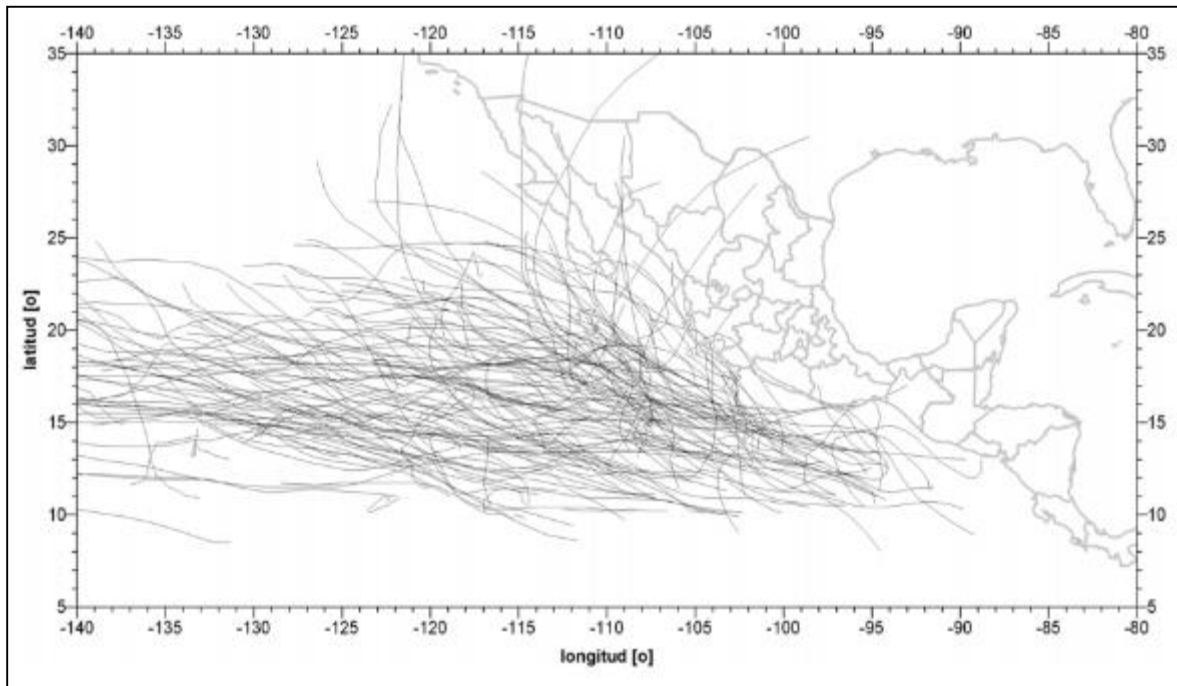


Figura 12. Trayectoria de ciclones tropicales, (1991-2000) en Océano Pacífico

b) Lluvia orográfica

Este tipo de precipitación se presenta cuando los vientos se encuentran cargados de humedad, los cuales se mueven en dirección del océano a tierra firme, cuando las masas de aire tienden a encontrar barreras montañosas, estas son forzadas a ascender, enfriándose y originando de esta forma precipitaciones en forma de lluvia o nieve. (CENAPRED, 2004)

c) Lluvia invernal (frentes fríos)

Estas precipitaciones están asociadas al paso de un ciclón y pueden corresponder a dos casos: no frontal y frontal. La precipitación no frontal puede ocurrir en cualquier depresión barométrica, resultando el ascenso debido a la convergencia de masas de aire que tienden a rellenar la zona de baja presión. La precipitación frontal puede estar asociada a un frente frío o a un frente cálido (Campos, 1998).

d) Lluvia convectiva

Este tipo de precipitación tiene como origen la inestabilidad de una masa de aire más caliente que el circundante. La masa de aire caliente asciende y se enfría adiabáticamente, alcanzando su punto de condensación debido a la velocidad vertical adquirida, formándose nubosidad de tipo cumultiforme, la cual genera precipitaciones en forma de aguaceros. (CENAPRED, 2004)

Inundación fluvial, se generan cuando el agua que se desborda de los ríos queda sobre la superficie de terreno cercano a ellos. A diferencia de las pluviales, en este tipo de inundaciones el agua que se desborda sobre los terrenos adyacentes corresponde a precipitaciones registradas en cualquier parte de la cuenca tributaria y no necesariamente a lluvia sobre la zona afectada. Es importante observar que el volumen que escurre sobre el terreno a través de los cauces, se va incrementando con el área de aportación de la cuenca, por lo que las inundaciones fluviales más importantes se darán en los ríos con más desarrollo (longitud) o que lleguen hasta las planicies costeras. (CENAPRED, 2004)

Inundación costera, se presentan cuando el nivel medio del mar asciende debido a la marea y permite que éste penetre tierra adentro, en las zonas costeras, generando el recubrimiento de grandes extensiones de terreno. Como su nombre lo indica, este tipo de inundaciones se genera en las costas, por lo que los elementos fundamentales de este fenómeno hidrometeorológico son: la marea de tormenta y el oleaje. La marea de tormenta es generada por los vientos de los ciclones tropicales y la disminución de la presión atmosférica en el centro de estos meteoros. (CENAPRED, 2004)

Inundación por falla de infraestructura hidráulica, este tipo de inundación se genera cuando la capacidad de las obras destinadas a la protección es insuficiente, esta será mayor que si no existieran obras. Las inundaciones por falta de infraestructura hidráulica son generadas principalmente por la insuficiencia de obras de almacenamiento y control de las mismas. Y puede presentarse por tres causas:

a) Diseño escaso

Se origina por la falta de información hidrológica ya sea de la cuenca o de la climatología. Así mismo se encuentra la falta de criterio o metodología inapropiada para llevar a cabo el diseño y construcción de las obras hidráulicas.

b) Mala operación

Este punto se refiere al uso de las compuertas. Cuando su abertura es demasiado grande, puede llegar a ocasionar una descarga superior a lo necesario, conduciendo la descarga aguas abajo y provocando un posible desbordamiento del río y en consecuencia una inundación. Por otro lado, cuando el uso de la compuerta es mínimo, el nivel de agua puede superar la capacidad de la presa, poniendo en peligro la estabilidad de la cortina.

c) Falta de mantenimiento o término de la vida útil

Algunas de las presas que se encuentran en nuestro país fueron construidas hace más de 100 años, terminando con la vida útil del proyecto. En ocasiones el azolvamiento y las infiltraciones reducen el tiempo de vida de los proyectos como lo son las presas (CENAPRED, 2004).

De acuerdo al tiempo de respuesta de la inundación se define en base al tiempo de respuesta de la cuna, el cual depende de su fisiografía y pueden ser:

Inundación lenta, cuando ocurre una sobresaturación del suelo a causa de una precipitación, el suelo no puede seguir absorbiendo más agua de lluvia; por lo cual, el volumen remanente escurre por los ríos y arroyos o sobre el terreno. El escurrimiento avanza proporcionalmente al incremento del área drenada. Si el volumen que fluye por el cauce excede la capacidad de éste, se presentan desbordamientos sobre sus márgenes y el agua puede quedarse estancada durante horas o días.

Este efecto se presenta regularmente en zonas donde la pendiente del cauce es pequeña, donde la capacidad de los ríos disminuye considerablemente, provocando

desbordamientos y generando como consecuencia inundaciones en la zona. Cuando existe la infraestructura adecuada, se puede prevenir daños colaterales como son las inundaciones (CENAPRED, 2004).

Inundación súbita, son resultado de lluvias repentinas e intensas que ocurren en una zona específica. Dichos fenómenos tienen la capacidad de causar grandes estragos en pocos minutos. Las zonas urbanas son el principal sitio donde este tipo de inundaciones se presenta, el origen de este fenómeno reside en la existencia de edificios y calles, los cuales crean una cubierta impermeable artificial, en donde es influenciada por la deforestación. Debido a ello, el agua no puede infiltrarse, provocando el escurrimiento del volumen precipitado. (CENAPRED, 2004)

Aunque las inundaciones súbitas son las responsables de la mayoría de las muertes humanas; estas dependen del tiempo de respuesta de las instituciones de protección civil, ya que ante la ocurrencia de una inundación, el tiempo requerido es de cinco horas, cuando las avenidas se presenten en un tiempo menor serán consideradas como súbitas, de lo contrario, se clasificarán como lentas (CENAPRED, 2004).

1.3 Impacto de las inundaciones en México y el mundo.

En los últimos años ha incrementado el interés en el uso de los instrumentos financieros para el desarrollo de los países que se han visto afectados por el impacto de desastres naturales. La razón principal de esta acción pudiera estar relacionada con la cantidad de desastres naturales que impactan a los países en desarrollo o vías de desarrollo, así como la pérdida económica y humanitaria.

De acuerdo con la Cruz Roja Internacional, la Ciudad de México se ubica en el lugar N°11 de las ciudades más vulnerables económicamente al impacto de un desastre natural (Figura 13). El presente diagnóstico es resultado del Índice de Riesgo y peligro para las grandes ciudades realizado por la aseguradora internacional Munich Re Group, en donde se calcula la vulnerabilidad de las grandes ciudades cuya población asciende a más de dos millones de personas (IFRC-RCS, 2010).

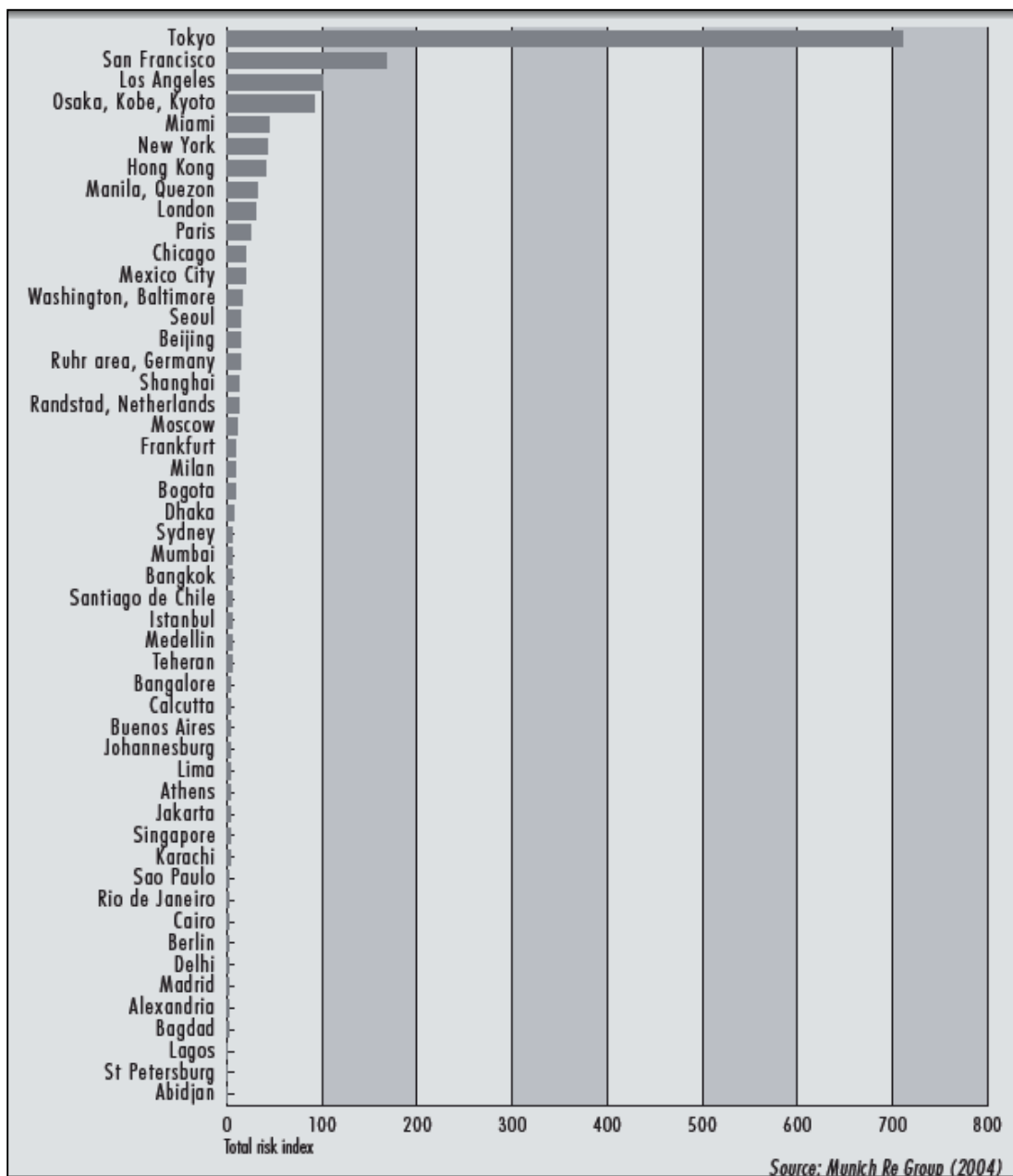


Figura 13. Índice de riesgos y peligros en grandes ciudades

Es importante mencionar que dicho análisis evalúa de forma principal tres variables: Exposición a peligros, valor de la propiedad expuesta y vulnerabilidad de la construcción al medio ambiente; esta última es calculada bajo una estimación, en donde se toma en cuenta la susceptibilidad de las viviendas o construcciones al impacto de un desastre natural, la planificación urbana respecto a los peligros

específicos, la protección contra inundaciones y la densidad de construcción. Por otro lado; los valores de las propiedades expuestas se calculan utilizando los valores medios por hogar y el PBI para comercio e industria (IFRC-RCS, 2010).

A lo largo de la historia, México ha sido impactado por diferentes desastres naturales, su fisiografía y posición geográfica son variantes fundamentales que alientan la posibilidad o susceptibilidad del país a ser atacados por dichos fenómenos. Así mismo, México es considerado como una nación en vías de desarrollo por lo que se esperaría que las pérdidas económicas generadas a partir del arribo de fenómenos naturales se conviertan rápidamente en desastres naturales y con ello la incapacidad de solventar tales cuestiones. Lamentablemente esa es la realidad de nuestra nación, pues a lo largo de casi 105 años (1900 a 2013) México ha sido impactado por 243 fenómenos naturales entre los que se encuentran terremotos, inundaciones, epidemias, incendios, temperaturas extremas (cálidas y frías), actividades volcánicas, sequías y derrumbe de tierras mejor conocidos como deslizamientos (Munich Re, 2013).

El número de muertes asciende a 23,191 personas, representando una pérdida humanitaria anual de 201 personas. Así mismo, el número de personas afectadas a lo largo de la historia es de 18,899, 296, mientras que la pérdida económica es de aproximadamente US 43,629,210,000.00, lo que daría un promedio anual de 379 millones de dólares al año (Cuadro 2) (CRED, 2013). Por otra parte, como se muestra en el Cuadro 2, el desastre natural que genera la mayor cantidad de muertes en nuestro país son los terremotos, mientras que aquellos que generan un mayor daño son las tormentas conectivas y ciclones tropicales, los cuales son asociados a los demás fenómenos hidrometeorológicos como lo son las inundaciones.

De acuerdo al Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), el año que ha registrado la mayor cantidad de daños en México es el 2007, el cual superó la pérdida económica registrada en el 2005, la cual fue de 4,248 millones de dólares, mientras que la del 2007 asciende a 4,633 millones de dólares.

Cuadro 2. Fenómenos naturales que han impactado México de 1900 a 2013.

Disaster type	Disaster subtype	Events count	Total deaths	Total affected	Total damage ('000 US\$)
Drought	Drought	7	0	2,565,000	1,610,000.00
Earthquake	Ground movement	32	10,686	2,658,353	6,161,000.00
Epidemic	Viral disease/Bacterial diseases	3	68	53,212	0.00
Extreme temperature	Cold wave	14	718	136,000	582,600.00
Extreme temperature	Heat wave	3	470	0	0.00
Flood	Flash/Coastal/Riverine	71	4,803	5,146,578	4,799,400
Storm	Conective storm/Tropical cyclone	86	4,884	8,177,925	30,268,010
Landslide	Landslide	12	332	320	0.00
Volcanic activity	Ash fall	10	1,120	161,908	117,000.00
Wildfire	Land fire Brush/Forest fire	5	110	0	91,200.00
Total		243	23,191	18,899,296	43,629,210

A pesar de que en el 2007 la actividad ciclónica no fue tan intensa como el 2005, se presentaron grandes repercusiones en el país puesto que tres cuartas partes del estado de Tabasco se encontraban bajo el agua, se generaron más de tres millones de afectados y 526 descensos, Cuadro 3. (CENAPRED, 2004).

Cuadro 3. Resumen de pérdidas por fenómenos ocurridos durante 2007.

Fenómeno	Muertos	Población afectada (personas) ¹	Viviendas dañadas	Escuelas	Hospitales	Área de cultivo dañada y/o pastizales (ha)	Caminos afectados (km)	Total de daños (millones de pesos)	Porcentaje total
Hidrometeorológicos	187	2,997,258	225,835	5,463	529	723,899.7	18,474.4	49,417.5	97.58
Geológicos	72	4,845	872	4	0	0.0	0.0	1,047.1	2.07
Químicos	36	2,118	50	0	0	141,664.1	0.0	143.7	0.28
Sanitarios	6	67	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.00
Socio-organizativos	225	32,570	21	0	0	0.0	0.0	35.8	0.07
Total	526	3,036,858	226,778	5,467	529	865,563.8	18,474.4	50,644.0	100.00

¹ Se consideran los heridos, evacuados y damnificados.
² Los fenómenos químicos incluyen: fugas, derrames e incendios.

Finalmente, en el 97.6% de los fenómenos registrados en el país fueron de origen hidrometeorológico, generando la declaración por desastres de 634 municipios, 73.7% se debió al impacto de ciclones tropicales, 23.6% por lluvias, 2.5% por

inundaciones y 0.2% por tornados. Entre el 2000 y 2007 el número de muertos registrados por estos fenómenos fue de 1,144 y los daños superaron los 1,119 millones de pesos, lo cual es equivalente al monto del Producto Interno Bruto del conjunto de los estados de Colima, Nayarit y Tlaxcala para el año 2005 (CENAPRED, 2004). Es por este motivo y más que las acciones de planeación y prevención resultan indispensables para erradicar los posibles daños generados por dichos fenómenos.

Al ser las inundaciones el fenómeno más recurrente y uno de los principales en generar la mayor cantidad de estragos económicamente medibles en el país, indispensable generar planes de acción que mitiguen sus posibles efectos pues se sabe que la causa principal de las inundaciones en México es la pérdida de la capacidad hidráulica en las corrientes así como la urbanización mal planificada generada a partir de los inadecuados cambios de uso de suelo.

1.4 Mapas de riesgo por inundaciones.

Para analizar de forma íntegra el fenómeno de inundaciones es necesario estimar el riesgo en una zona determinada, para esto es fundamental conocer los conceptos que integran el riesgo (peligrosidad, vulnerabilidad y exposición), para ello se generan los mapas de riesgo; mismos que son definidos como la representación gráfica de los potenciales daños en un sitio (ciudad, localidad, vía de comunicación, etc.), generados por algún fenómeno natural o antropogénico (inundación, sismo, explosión de material químico, etc.) que lo afecte (CENAPRED, 2004).

1.4.1. Gestión de riesgos.

El riesgo es definido como la probabilidad de ocurrencia de daños, pérdidas o efectos indeseables sobre sistemas constituidos por personas, comunidades o sus bienes, como consecuencia del impacto de eventos o fenómenos perturbados (CENAPRED, 2004).

1.4.1.1. Clasificación de riesgos.

Los riesgos tienen diferentes clasificaciones, su mayoría se rige por su origen y su causa. A continuación se describe de forma breve cada uno de ellos.

Riesgos naturales, se definen como la probabilidad, grande o pequeña, de que se produzca un daño o catástrofe sobre la población de una zona debido a la actuación de un proceso natural. Hay que diferenciar el proceso en si del riesgo que deriva del mismo, el cual está en función de la manera en que las personas podrían verse afectadas por dicho proceso natural. En consecuencia, el concepto de riesgo natural implica una interdependencia entre humanidad y procesos naturales. Aquellos riesgos que son provocados o potencializados por la acción antrópica reciben el nombre de riesgos naturales inducidos o riesgos mixtos. Como por ejemplo la extracción de fluidos (petróleo, agua), minería subterránea, drenaje de zonas pantanosas, etc.

A su vez, los riesgos naturales pueden ser de varios tipos:

Riesgos cósmicos. Tiene su origen fuera de nuestro planeta y, fundamentalmente, son la caída de meteoritos y los derivados de cambios en la cantidad de radiación solar que nos llega.

Riesgos biológicos. Se deben a la actividad de los seres vivos. Los más importantes corresponden a la producción de plagas y epidemias, aunque tampoco se debe olvidar el deterioro ocasionado en las construcciones por microorganismos vegetales y aves.

Riesgos geológicos. Son aquellos que derivan de los procesos geológicos y se agrupan en dos categorías:

Endógenos o de origen interno. Son los causados por los volcanes, terremotos y diapiros.

Exógenos o de origen externo. Son muy variados, en la mayoría de los casos dependen del clima en mayor o menor medida (inundaciones, ciclones,

deslizamientos, desprendimientos de rocas, hundimientos y erosión del suelo (Montes, 2011).

1.4.1.2 Cálculo de riesgo.

La magnitud de un riesgo no depende únicamente de la intensidad del proceso causante, sino también de su capacidad para afectar a las personas y/o a sus bienes, para evaluar dichos riesgos se deben considerar sus factores, los cuales son:

Peligrosidad (Probabilidad de que ocurra un desastre).

Exposición (Tamaño de la población expuesta y/o sus bienes)

Vulnerabilidad (Susceptibilidad o propensión de los sistemas expuestos a ser afectados).

El riesgo de un suceso (R) es calculado, multiplicando su peligrosidad (P) por la exposición (E) y por la vulnerabilidad (V), expresado en tanto por uno.

$$R = P \times E \times V$$

Si la exposición se indica mediante la población involucrada, se calcularía el riesgo social en víctimas por año. Mientras que si se expresa por medio de los bienes expuestos, se calcularía el riesgo económico en unidades monetarias al año.

A continuación se describen cada uno de los factores que conforman el riesgo.

Peligrosidad. La peligrosidad es la probabilidad de que ocurra un suceso, potencialmente perjudicial en una región y en un momento determinado. El objetivo principal de un estudio de peligro en una zona de interés es lograr el conocimiento del fenómeno que lo ocasiona mediante la identificación y medición de su intensidad y zona de alcance o influencia.

De igual forma, en el estudio de la peligrosidad se debe de considerar:

Distribución geográfica de un suceso. El riesgo de los diversos tipos de desastres varía en las distintas regiones del planeta. Por otro lado, es importante establecer la

extensión superficial afectada por el suceso en cuestión ya que, cuanto mayor sea ésta, mayores suelen ser los daños.

Periodo de retorno. También llamado intervalo de recurrencia, el cual es definido como el tiempo que en promedio debe pasar entre dos eventos con intensidad mayor o igual a la del evento en análisis. El período de retorno se calcula como el inverso de la tasa de excedencia, y mediante algunas suposiciones puede encontrarse una relación matemática entre el periodo de retorno y la probabilidad de ocurrencia (o excedencia) para un período de exposición dado.

Grado de peligrosidad. Indica la intensidad con que un fenómeno puede afectar a la zona considerada. Esto es consecuencia del proceso en si mismo e independiente de la población y otros factores socioeconómicos. (Montes, 2011)

Para determinarla es preciso conocer la naturaleza del suceso en cuestión, magnitud, su distribución geográfica y frecuencia. A partir de estos datos es posible establecer un grado de peligrosidad (Montes, 2011). Como se puede observar en la Cuadro 4, existen cinco grados de peligrosidad, los cuales van del cero a cuatro, correspondiendo a la magnitud del riesgo, la cual tendrá como base las variables antes mencionadas (magnitud del suceso, distribución geográfica y frecuencia). Es importante aclarar que estos valores son adimensionales.

A veces, únicamente se consideran dos hipótesis: Peligrosidad máxima (equivalente al suceso de mayor magnitud ocurrido en la zona sometida a estudio) y Peligrosidad media (corresponde al suceso cuya intensidad es más frecuente en dicha zona). Otras veces, en vez de diferenciar varios grados de peligrosidad, se considera su severidad o intensidad, la cual está relacionada con la probabilidad, pues cuando más intenso o severo es un peligro, es menos frecuente.

Cuadro 4. Niveles de peligrosidad de riesgo

Niveles de peligrosidad de riesgo	
Grado	Peligrosidad
0	Sin información
1	Nula
2	Baja
3	Moderada
4	Alta

Por otro lado, de acuerdo al CENAPRED, desde el punto de vista de las inundaciones, el método ideal para la obtención del peligro se basa en la información que se registra en las estaciones hidrométricas, a partir de las cuales se conoce el escurrimiento y solo se caracteriza estadísticamente la avenida; sin embargo, en la mayoría de los casos no se cuenta con tal información, por lo que un método alternativo es usar un modelo de lluvia-escurrimiento (CENAPRED, 2004).

Vulnerabilidad. La vulnerabilidad es la proporción, con relación al total expuesto, de las víctimas humanas o de pérdidas económicas causadas por un suceso. La estimación de la vulnerabilidad de un sistema ante un peligro dado depende de las características del fenómeno. El objetivo de una evaluación de vulnerabilidad es encontrar una relación entre las intensidades de los fenómenos y los daños o pérdidas probables de los bienes en un asentamiento o lugar de interés, debido a dicha intensidad. En cuanto a la estimación de las pérdidas económicas se utiliza el llamado índice de coste, definido como el valor medio de las pérdidas previsibles en unidades monetarias, por persona y por suceso, en función del grado de peligrosidad del riesgo en cuestión. (Montes, 2011)

La vulnerabilidad es el factor de riesgo más fácil de reducir, ya que la mayoría de los riesgos naturales admiten algún tipo de actuación en este sentido: reforzamiento de edificios para evitar el hundimiento de los techos, instalación de pararrayos, cimentaciones adecuadas, construcciones sismoresistentes, etc. La utilización de tales medidas estructurales está en relación con el desarrollo económico, por lo que

la vulnerabilidad es mayor en los países menos desarrollados, y ésta es la causa de que los desastres naturales tengan una mayor incidencia en el Tercer Mundo.

Exposición. Es el número total de personas (exposición social) o la cantidad total de bienes materiales (exposición económica) que pueden verse afectados por un suceso. Los mapas de exposición se elaboran toando como referencia la densidad de población y dividiendo la zona considerada en cuadrículas según su número de habitantes (Montes, 2011).

1.5 Construcción de mapas por Software

El objetivo de la construcción de un mapa mediante la técnica de Índice de Inundación (Uribe y col. 2010), desarrollada en 2008, y a la que se le han realizado diversas mejoras, consideradas en este trabajo (Montes, 2011), es conocer las áreas susceptibles de ser inundadas ante un determinado periodo de retorno, o la replicación de algún evento en especial. Con esta metodología, es posible cuantificar la extensión de la afectación ante la ocurrencia del evento mencionado, para posteriormente realizar un estudio más detallado de alguna zona en especial y proponer las soluciones más adecuadas para mitigar el efecto de inundación. En la Figura 15, se muestra el procedimiento más a detalle necesario para la obtención de un escenario mediante el Índice de Inundación.

La construcción del mapa de Índice de Inundación se realizó con base en el concepto de acumulación de flujo, que es definido como el área de drenaje parcial “aguas arriba” hacía un punto en particular. Dicho concepto es combinado con los mapas de precipitación (con diferentes probabilidades de recurrencia) y el método de “Curva Numérica” para estimación de escurrimiento. De manera que es posible determinar la cantidad total de agua que escurre hasta un punto dado así como su probabilidad de ocurrencia.

Otro de los puntos que considera es que una celda o pixel puede tener 8 posibles direcciones y elegirá la celda que contigua que tenga la elevación más baja, o la de

mayor pendiente, cada celda tiene un valor basado en la ruta de mayor pendiente (Figura 14), el resultado de la dirección del flujo se puede ver en la Figura 20 para la región hidrológica 29.

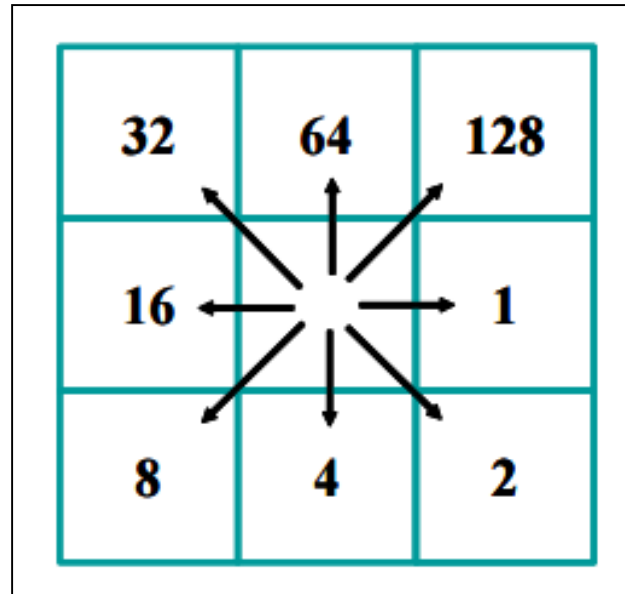


Figura 14. Las 8 posibles direcciones que puede tomar el flujo.

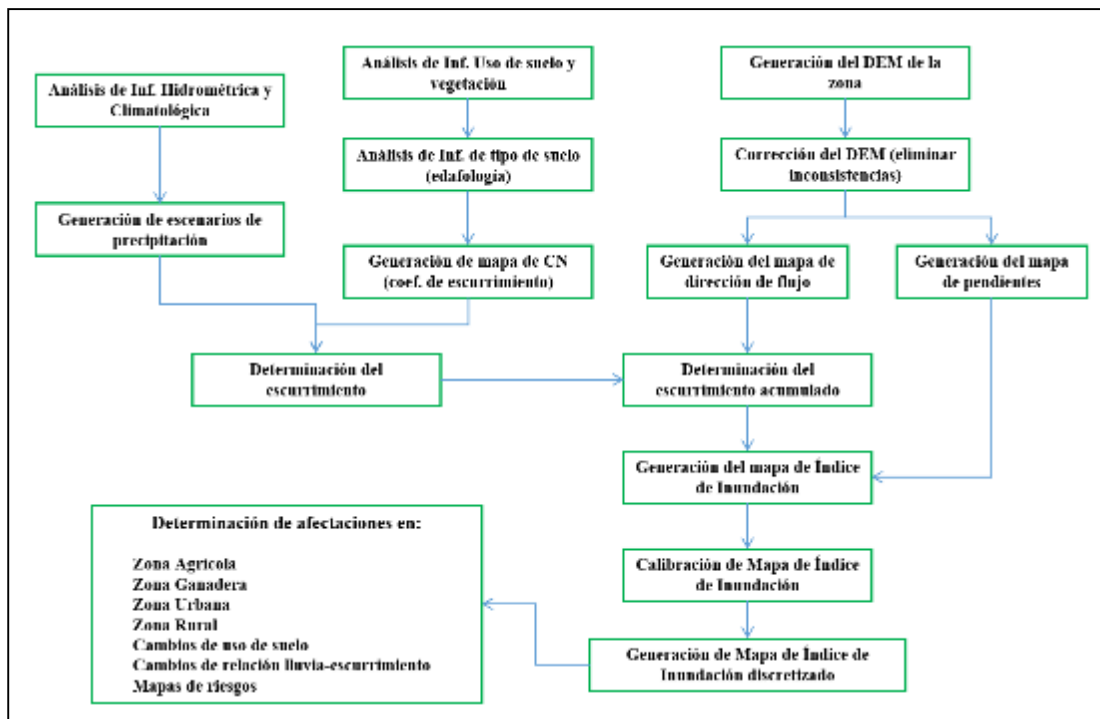


Figura 15. Metodología del Índice de Inundación (Montes, 2011)

Este índice se apoya en lo que se conoce como Índice Topográfico, el cual, se emplea por primera vez en 1979, cuando se definió un índice para identificar humedales conocidos como zonas perennes y efímeramente saturadas o inundadas a partir de datos de topografía. El índice de Inundación que se propone tiene como base la siguiente información:

- Topografía: Determina el movimiento (dirección) y distribución del escurrimiento.
- Precipitación: Determina la cantidad y distribución de la precipitación para un evento determinado.
- Edafología, vegetación, y uso de suelo: Determina la respuesta del suelo a eventos de precipitación en función de la Curva Numérica (CN).
- División fisiográfica de las 37 regiones hidrológicas en las que está dividido el país.

A diferencia del índice topográfico, el Índice propuesto permite distinguir cuencas con características climatológicas, con tipo y uso de suelo diferentes, que es indispensable dada la diversidad del país.

El Índice de Inundación (II) se determinó de acuerdo con la expresión siguiente:

$$II = \ln \left[\frac{\text{Acumulación de Escurrimiento}}{\tan s} \right] = \ln \left[\frac{Ac Q}{\tan s} \right] \quad [1]$$

donde:

II	Índice de Inundación
Ac Q	acumulación de escurrimiento
tan s	tangente del ángulo de la pendiente

Una vez que se aplica el algoritmo anterior a la región hidrológica o cuenca en estudio, el resultado obtenido debe ser calibrado, lo cual puede lograrse mediante

varias opciones como: imagen satelital, imagen de radar, modelo matemático o fotografías aéreas (Figura 17), teniendo en cuenta que se debe tener la información sobre la distribución de lluvia asociada a dicho evento, así como su periodo de retorno. En algunos casos cuando no se cuente con información al respecto, se sugiere realizar encuestas y recorridos en campo para ubicar la extensión de las afectaciones y corroborar estas con las personas que habitan la zona. El dato que se obtiene con esta calibración es el valor umbral a partir del cual se considera que alguna región es susceptible de ser inundada (Montes, 2011).

Una vez determinado el umbral es posible generar diversos escenarios, asociados a diferentes eventos o periodos de retorno, para determinar la magnitud de la problemática en la que se encuentra la zona de interés y pueden ser cualquiera de las cuatro que se mencionan a continuación:

- a) que en el área inundada se encuentren asentamientos y/o infraestructura desarrollada,
- b) que el área inundada sea una zona agrícola y/o ganadera,
- c) que el área inundada sea una zona donde se pretenda desarrollar nueva infraestructura,
- d) que sea una zona libre de peligro por inundación.

En cualquiera de los tres primeros casos será necesario realizar una modelación matemática más detallada y así sugerir la solución más adecuada a la mitigación del riesgo por inundación, la cual puede incluir acciones estructurales (bordos, desvíos, etc) o acciones no estructurales (reforestación, restricción en los cambios de uso de suelo, etc).

1.6 Área de estudio

- a) La ubicación geográfica (Figura 16) de la región hidrológica 29 la hace propensa a presentar una alta incidencia de efectos secundarios (Inundaciones) debido a ello.

- b) De acuerdo a la distribución de la precipitación media anual (PMA) en México, la región hidrológica 29 está ubicada en la zona donde se tiene PMA que va de 1,301 a 4,500 mm/año.
- c) El cauce del río Coatzacoalcos es uno de los 7 más caudales del país, ocupa el tercer lugar
- d) Es una zona con una alta inversión en infraestructura petrolera.
- e) De acuerdo con el Censo de población de INEGI 2010, en la región en conjunto se tiene una población de aproximadamente 350,000 habitantes.

La región hidrológica 29 “Cuenca del Río Coatzacoalcos” (Lat. 17°42'00” a 16°37'48” N y de Long. 95°43'48” a 94°10'12” W) ubicada en la llanura costera del Golfo de México, limitada al sur por la Sierra Madre del sur y al norte por la misma Cuenca del Río Coatzacoalcos (Gutiérrez, 2013), esta cuenca tiene una extensión de 30,217 km² y abarca 52 municipios de los cuales 25 pertenecen a Veracruz, 22 a Oaxaca, 5 a Tabasco y 1 a Chiapas, haciendo un total de población en conjunto de aproximadamente 350,000 habitantes de acuerdo al Censo de población de INEGI 2010, su cauce principal es el río Coatzacoalcos con un escurrimiento medio anual de 28,903 m³/s, y con escurrimiento total de la cuenca de 39,482 m³/s, está es la tercera cuenca con mayor escurrimiento en México, sólo detrás de la Grijalva-Usumacinta y de la Papaloapan.

Por su importancia tanto ecológica así como los servicios ambientales que prestan los humedales de Coatzacoalcos son considerados una subunidad de planeación a nivel regional. Debido a que el río Coatzacoalcos es una de las rutas fluviales más importantes de México, esta cuenca cuenta con zonas naturales con características biológicas muy particulares, ya que presenta desde ecosistemas acuáticos compuestos por diferentes tipos de humedales como bosque de galería, popales, tulares y manglares en sus zonas bajas, y ecosistemas terrestres como bosques de niebla, bosques de encino, bosque de pino, bosque de pino-encino en las partes más altas, y selvas a diferentes rangos de altitud, también se encuentran ecosistemas de dunas costeras. (Uribe, 2005)

El sistema hidrográfico de Coatzacoalcos es el tercero más importante del país debido a su caudal. Este sistema está constituido por afluentes muy importantes como: Río Uxpanapa, Jaltepec, Coachapa y Calzadas.

La precipitación media anual es de 2,450 mm, superior al promedio nacional que es de 777 mm. Las precipitaciones más altas se presentan en las zonas cercanas a la Laguna del Ostión, donde oscilan entre 3,000 y 4,000 mm. Todas las subcuencas formadas por áreas de drenaje del Río Coatzacoalcos están sujetas a un régimen muy intenso de lluvias, dando lugar a coeficientes de escurrimiento muy altos (80% o mayores).

Por dicha cuenca escurre un promedio de 36,670 millones de metros cúbicos anuales, contribuyendo el Río Coatzacoalcos con el 42.7% y el Río Uxpanapa con el 25.2% del agua superficial de la cuenca, de donde solo se utiliza el 1% del agua disponible y el resto desemboca en el Golfo de México.

Las principales obras hidráulicas en la cuenca corresponden a los Acueductos Uxpanapa-La Cangrejera para uso industrial con capacidad de proyecto de 20m³/s y al Yurivia- Coatzacoalcos para uso público Urbano.

Se reconoce como el acuífero más importante en la cuenca al Costero de Coatzacoalcos, contando con otro de menor importancia el Hueyapan-Soteapan. La extracción de subterránea asciende a 128 mm³, valor superado por la recarga natural que es de hasta 131mm³. Aun cuando se considera como sobreexplotado al acuífero regional Costero de Coatzacoalcos, se presentan problemas locales debido a la concentración de pozos, que si sigue con esta tendencia se podría provocar intrusión salina.

El aprovechamiento del agua asciende a 355.2 mm³ con lo cual se estima que todas las subcuencas cuentan con abundancia del recurso tanto superficial como subterránea. A pesar de esto, debido al aprovechamiento intensivo de agua

superficial por ausencia de almacenamiento, se presentan déficit en temporada de estiaje en ciertos puntos. Sin embargo, se ha observado que la disponibilidad de agua per capita ha disminuido en los últimos 50 años siendo en 1950 de 50, 000 m³ /hab/año a en 2000 de 31, 500 m³ /hab/año. Haciendo un estimado de acuerdo al crecimiento de población que para 2020 será de 23, 000 m³ /hab/año. (CCRC, 2013).

Como ya se mencionó la región hidrológica de Coatzacoalcos abarca cuatro estados: Veracruz, Chiapas, Tabasco y Oaxaca. Hasta 1995 se contaba con una población de 1, 101, 755 habitantes (INEGI). La distribución de la población urbana-rural varía según la entidad. Considerando la presencia de población indígena con un aproximado del 10% del total de los habitantes de la cuenca, entre los que se identifican grupos Mixes y Popolucas.

Las regiones urbanas sobresalientes en la cuenca son: Coatzacoalcos y Minatitlán con 42.2% de la población total de la cuenca, sin embargo, se cuenta con otros centros urbanos importantes como: Las Choapas, Agua Dulce y Cosoleacaque que en conjunto albergan el 9.2% de la población. (Ojeda, 2005).

Dentro de las actividades económicas que se desarrollan en los municipios que abarca la cuenca hidrográfica Coatzacoalcos encontramos actividades agropecuarias, como son la agricultura y cultivos de temporal, así sean de tallo corto y tallo largo, ganadería, pesca y captura de diversas especies acuáticas. Refinerías y extracción de petróleo, así como actividad industrial en la zona y el comercio al por mayor de lo producido. (Saldívar)

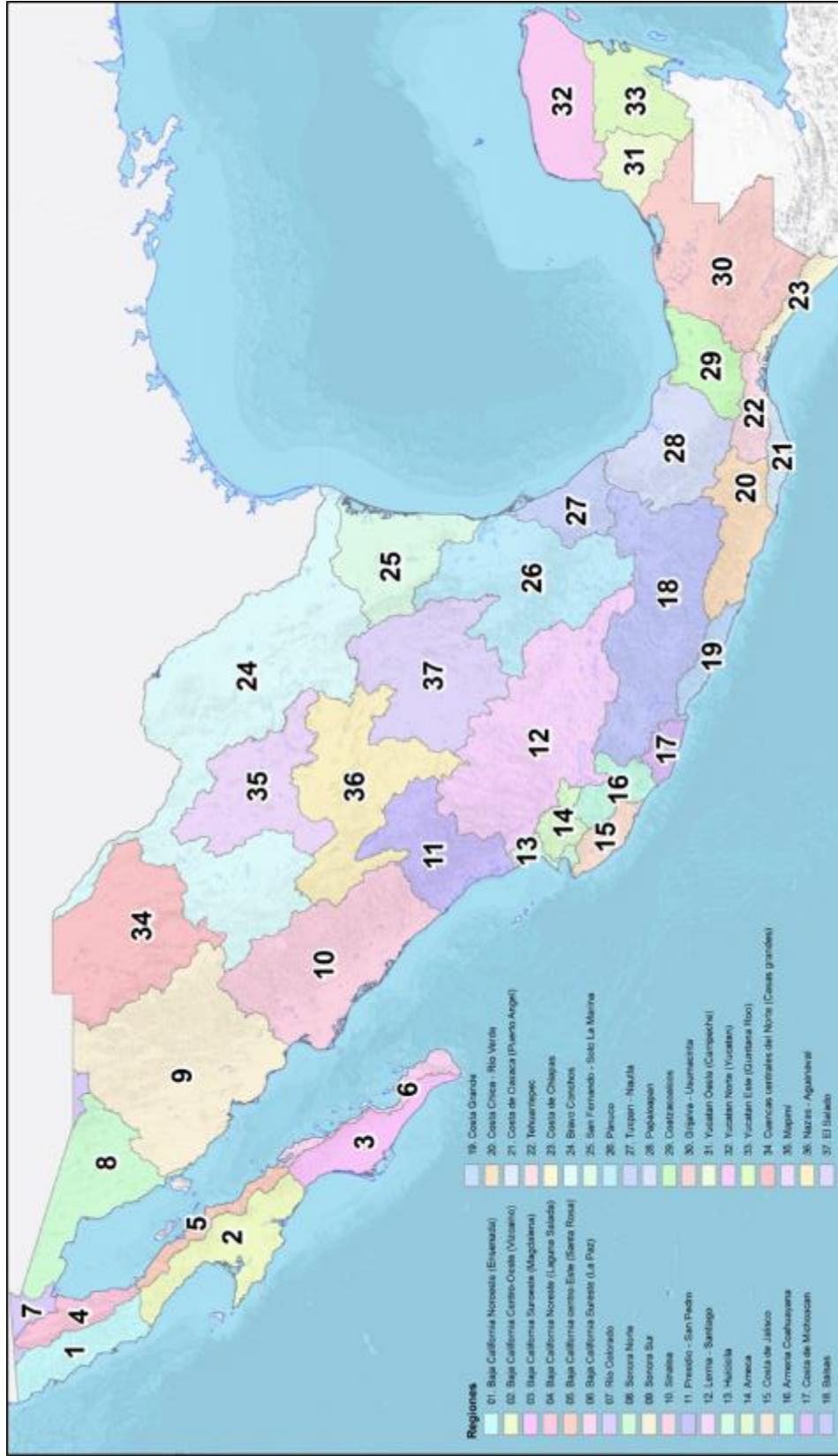


Figura 16. Regiones hidrológicas de México.

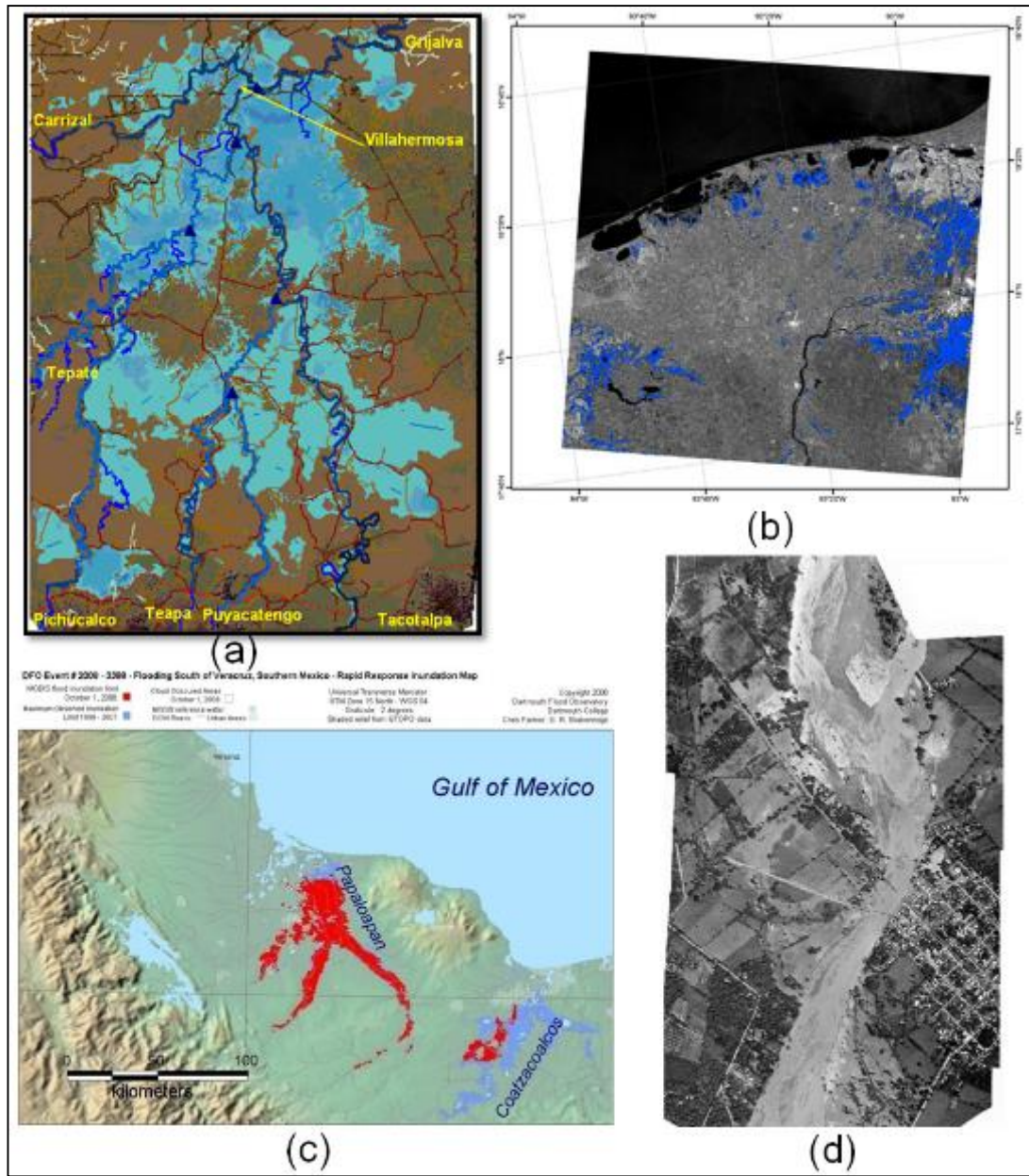


Figura 17. Fuentes para poder realizar calibraciones confiables: a) modelación matemática, b) imagen de radar, c) imagen satelital, d) fotografía aérea.

2. OBJETIVO

2.1 General.

Generar una herramienta para identificar los sitios o zonas susceptibles que puedan estar expuestas al peligro por inundaciones, para diversos escenarios extraordinarios.

2.2. Particulares

- Obtener la información bibliográfica referente a la Región Hidrológica RH29 (Río Coatzacoalcos)
- Generar un mapa de dirección de flujo de la RH29.
- Desarrollar un mapa para determinar el escurrimiento de la RH29.
- Generar un mapa de los escurrimientos acumulados de la RH29.
- Generar un mapa de índice de inundación.
- Calibrar el mapa de índice de inundación.

3. METODOLOGÍA

3.1 Materiales

SIG (Sistema de Información Geográfica)

3.2 Método

3.2.1 Recopilación de información bibliográfica de la Región Hidrológica RH29 (Río Coatzacoalcos).

De acuerdo a la metodología se obtuvo el polígono del área de estudio correspondiente a la Región Hidrológica No. 29 (Río Coatzacoalcos), así como se descargó de las bases de datos e información del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) los siguientes mapas de información:

- Modelo Digital de Elevación denominado “Continuo de Elevación Mexicano” (CEM) con el que se obtuvo la información correspondiente a topografía de la región y permitió determinar la dirección del movimiento y la distribución de los escurrimientos (Figura 19).
- Mapa de edafología de la región Serie II (Figura 20).
- Uso de suelo y vegetación Serie IV de la cuenca (Figura 21)

Los cuales son factores que permitieron determinar la respuesta del suelo a los eventos de precipitación, en función de la curva numérica (CN)(Figura 22). Con el fin de concluir la obtención de información y datos, se obtuvo los mapas de precipitación correspondientes a las isoyetas asociadas a diferentes períodos de retorno:

- $T_r = 2$ años (Figura 23)
- $T_r = 5$ años (Figura 24)
- $T_r = 100$ años (Figura 25)

Con las cuales se determinó la cantidad y distribución de la precipitación para eventos determinados, esto último proporcionado por la Comisión Nacional de Agua (CONAGUA).

Con el fin de realizar el tratamiento de la información previamente recabada se utilizó un software de Sistemas de Información Geográfica (SIG), con el cual se realizó cada uno de los procedimientos pertinentes para la obtención de los mapas a continuación descritos.

3.2.2 Mapa de dirección de flujo de la RH29.

Se cargó el archivo shape correspondiente a la Región Hidrológica No. 29 (RH29), así como el modelo digital de elevaciones de la República Mexicana. Se utilizó la herramienta “Extract by mask” para obtener el modelo digital de elevaciones exclusivo de la RH29 (Figura 19).

En el MDE que se obtuvo de la RH29 presentó un rango de altitud que va de -8 msnm (correspondiente a la zona baja en la desembocadura de los cauces) hasta una de 2318 msnm que corresponde a las partes más altas de la cuenca.

Una vez obtenido el mapa del modelo digital de elevaciones, se procedió a la corrección de las inconsistencias del terreno que presenta la región mediante la aplicación de la herramienta hidrológica “Fill”, para este procedimiento se utilizó el MDE anterior de la RH29, y con el resultado del tratamiento de las inconsistencias se pudo realizar mediante el uso de la herramienta hidrológica “Flow Direction” el mapa correspondiente a la dirección del flujo en la RH29. (Figura 26).

3.2.3 Mapa de escurrimiento (Q) de la RH29.

Con el fin de obtener el flujo en base al método de la SCS (Soil Conservation Service), se cargó los mapas de edafología (Figura 20) y uso de suelo y vegetación (Figura 21) dentro del programa correspondientes a la RH29, con los cuales se

generó el mapa de Curva numérica “CN” (Figura 22), el cual nos permite conocer el valor equivalente al coeficiente de escurrimiento.

Se utilizó el algoritmo del método SCS para obtener el factor S haciendo uso de la herramienta de mapeo algebraico “Raster calculator”, así como la ecuación siguiente:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

Una vez que se obtuvo los valores de S para la región se procedió a obtener el mapa correspondiente al flujo de escurrimientos (Q) para 3 diferentes períodos de retorno, por lo que se tomó cada uno de los mapas de precipitación (Figura 23 a la 25), los cuales como se mencionó anteriormente corresponden a las isoyetas asociadas a diferentes períodos de retorno (Tr= 2, 5 y 100 años), y se calculó, una vez más utilizando la herramienta de mapeo algebraico “Raster calculator” y aplicando la siguiente formula:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S}$$

Finalmente se obtuvo los mapas de flujo de escurrimientos (Q) de la región para cada uno de los períodos de retorno Tr de 2, 5 y 100 años. (Figura 27 a la 29 respectivamente).

3.2.4 Mapa de escurrimiento acumulado.

Para obtener el mapa de flujo acumulado se introdujo dentro de la herramienta hidrológica “Flow accumulation”, los mapas correspondientes a la dirección del flujo, así como los mapas de los escurrimientos asociados a diferentes períodos de retorno, con lo que se obtuvo como resultado los mapas de las Figuras 30 a la 32, que nos permitió observar los cursos de los cauces principales dentro de la región hidrológica.

3.2.5 Mapa de Índice de inundación.

Para obtener finalmente los mapas necesarios para realizar el cálculo del Índice de inundación (II), se obtuvo el mapa de pendientes de la región, el cual se realizó haciendo uso del mapa resultante de la aplicación de la herramienta hidrológica “Fill” anteriormente mencionado, para lo que se aplicó la herramienta de superficie “Slope”, con la cual se consiguió los ángulos de las pendientes. Es importante mencionar que se realizó un tratamiento a los datos resultantes de este mapa, debido a que los ángulos obtenidos eran valores en grados y se tuvo que realizar el cálculo a radianes y descartar los valores correspondientes a “0”, a fin de evitar indeterminaciones. Teniendo como resultado el mapa de la Figura 34.

Para la obtención del mapa del Índice de Inundación se aplicó la fórmula siguiente:

$$II = \ln\left(\frac{Ac Q}{\tan s}\right)$$

Se utilizó la herramienta de mapeo algebraico y la ecuación anterior con el fin de obtener los mapas del índice de inundación en bruto para cada Tr; a diferencia del índice topográfico, el índice que aquí se presenta nos permite obtener un panorama para las cuencas con características climatológicas, tipo de vegetación y uso de suelo diferente, lo cual es necesario debido a la diversidad del país (Montes, 2013). Los mapas de índice de inundación obtenidos para cada uno de los Tr de 2, 5 y 100 años, se muestran en las Figuras 35 a la 37, respectivamente, cabe aclarar que estos resultados son un “resultado en bruto”, ya que no cuenta con una calibración.

3.2.6 Calibración de mapa de Índice de Inundación.

El mapa que se obtuvo con la fórmula aplicada anteriormente fue necesario calibrarlo, lo cual de acuerdo a la metodología se puede realizar por diferentes métodos, los cuales pueden ser:

- Imagen satelital
- Imagen de radar
- Modelo matemático
- Fotografías aéreas

En este caso, se procedió a realizar la calibración con los resultados de un modelo matemático para el río Nachital, el cual fue desarrollado en InforWorks RS, para diversos períodos de retorno, este es un modelo detallado conformado por 125 secciones transversales sobre el cauce, se realizó la calibración para cada uno de los mapas de índice de inundación de los diferentes períodos de retorno Tr de 2 años (Figura 38), 5 años (Figura 39) y 100 años (Figura 40), con los valores umbral de los mapas de 5 y 100 años se realizó un análisis de regresión lineal (Figura 43) y se determinó el valor umbral del Tr de 2 años. Para el Tr de 5 años el umbral fue de 9.50 (Figura 41) y para el Tr de 100 años fue de 9.18 (Figura 42). Como resultado de este análisis se obtuvo el umbral de calibración para el Tr de 2 años el cual fue de 9.52 (Figura 44).

Para concluir la metodología se reclasificó los mapas de índice de inundación en bruto, de acuerdo a las estadísticas previas de la región, en donde se ha descrito las zonas que sufren mayor recurrencia de inundaciones en base a una estadística bimodal, el cual tiene una clasificación binaria, en donde el histograma presenta en la parte izquierda las zonas libres a la amenaza de inundación y del lado derecho las zonas con mayor probabilidad de ocurrencia de inundación, esto se realizó haciendo uso de la herramienta de análisis espacial “Reclassify” y se colocó el resultado final sobre imagen aérea de Google Earth (Figura 45 a la 47).

4. RESULTADOS

4.1 Recopilación de información.

A continuación se muestran los mapas requeridos para el análisis en estudio

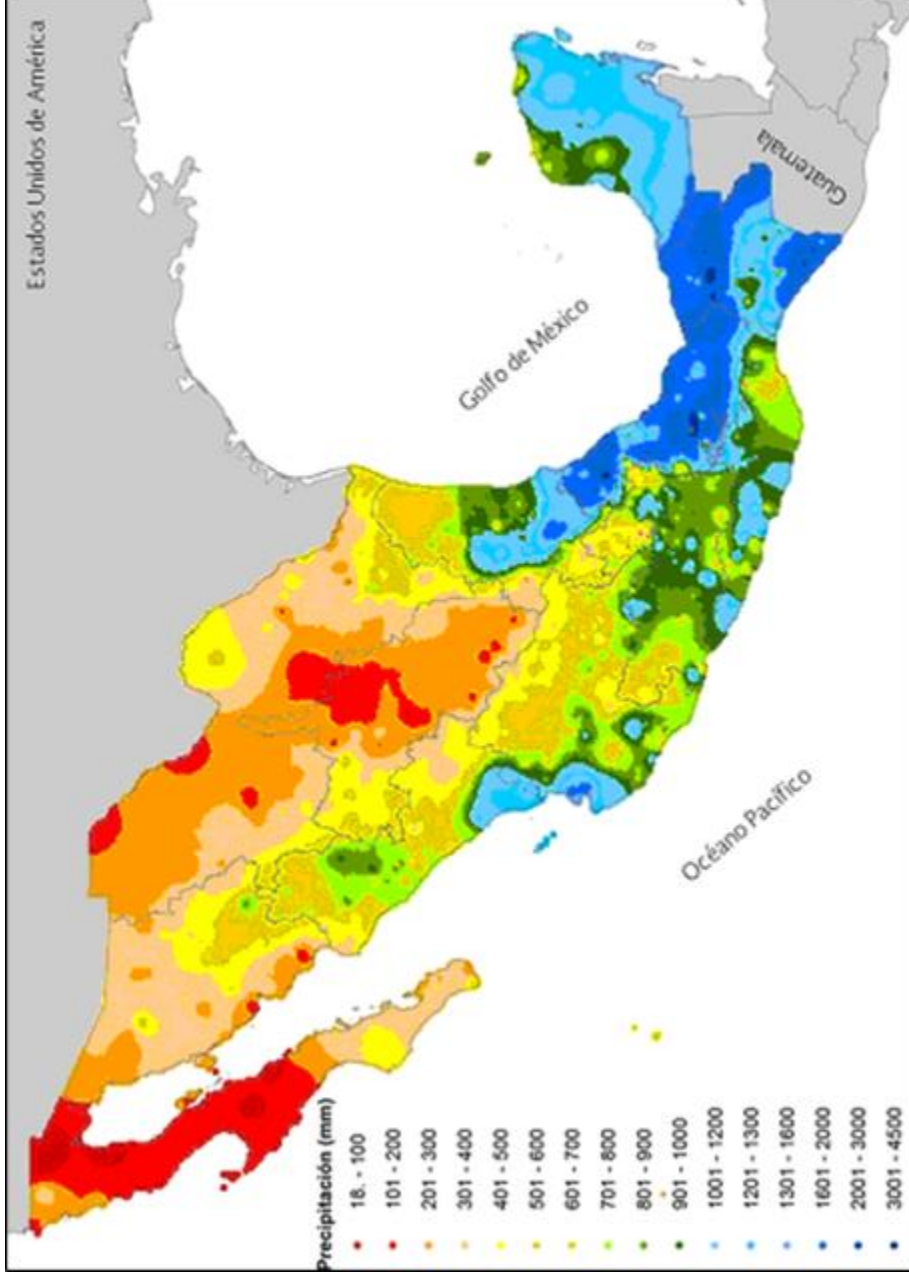


Figura 18. Distribución de la precipitación media anual (PMA) en México. (DOF: 08/04/2014)

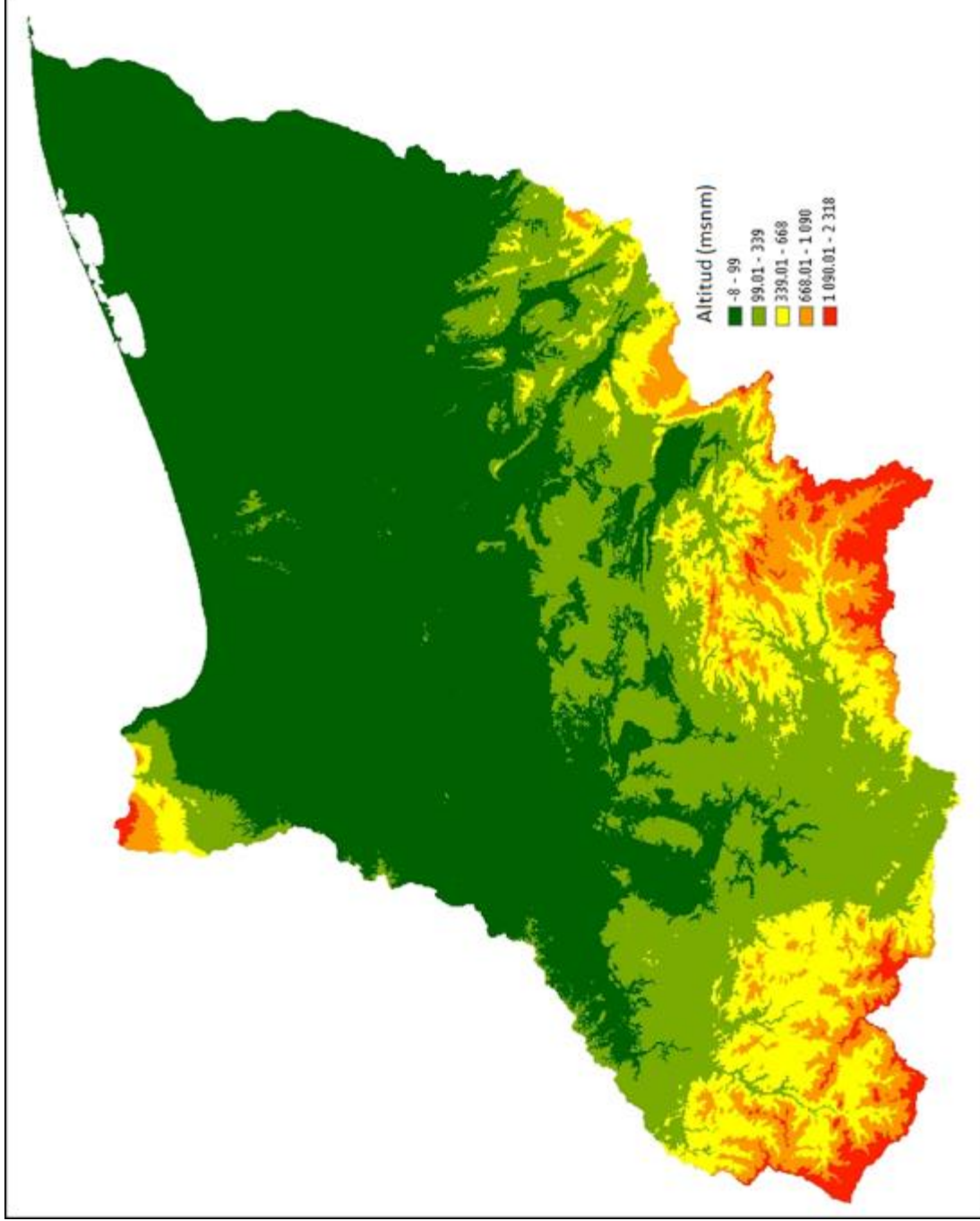


Figura 19. Modelo Digital de Elevación RH-29 (INEGI).

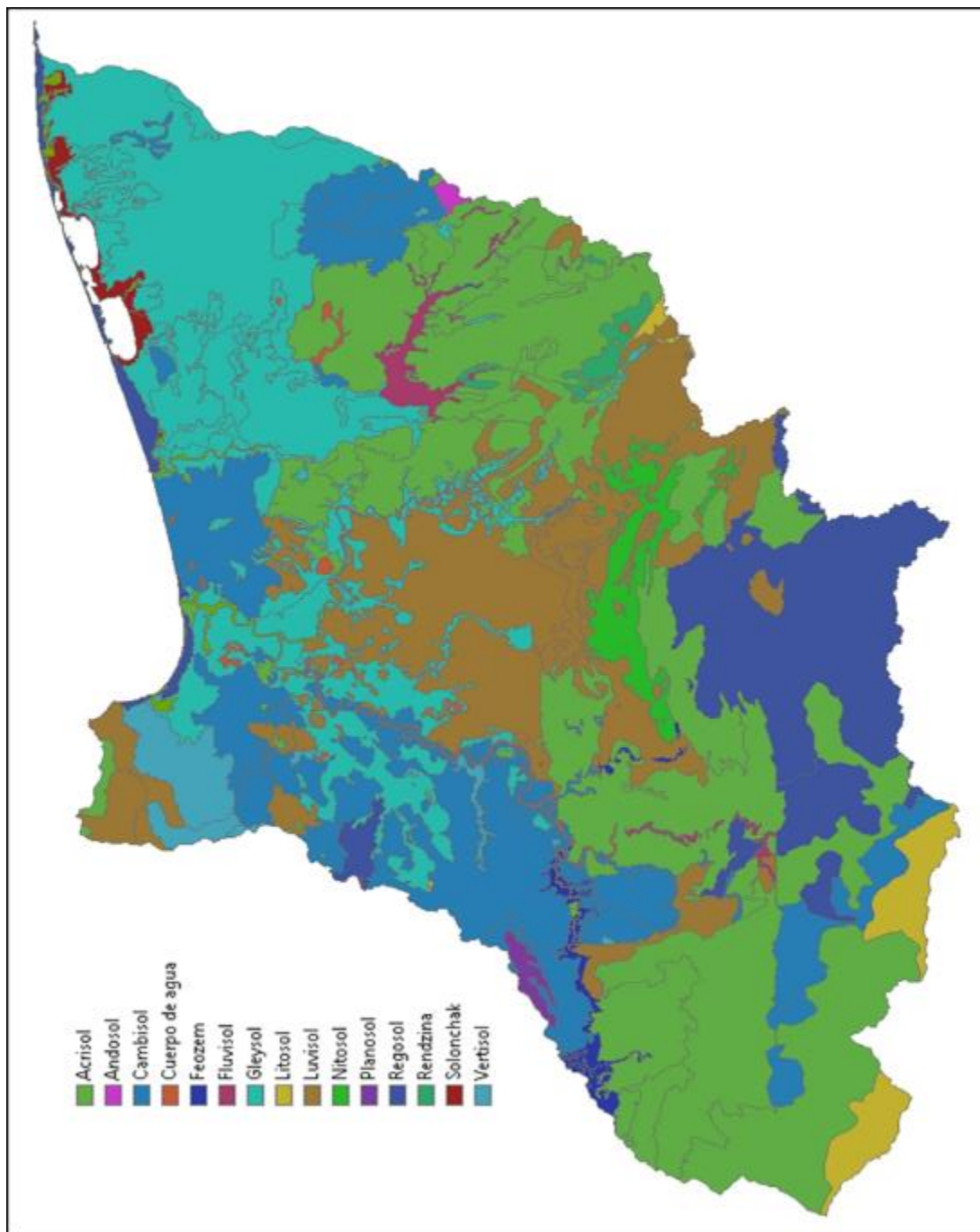


Figura 210. Edafología (tipo de suelo) de la región hidrológica 29. (INEGI)

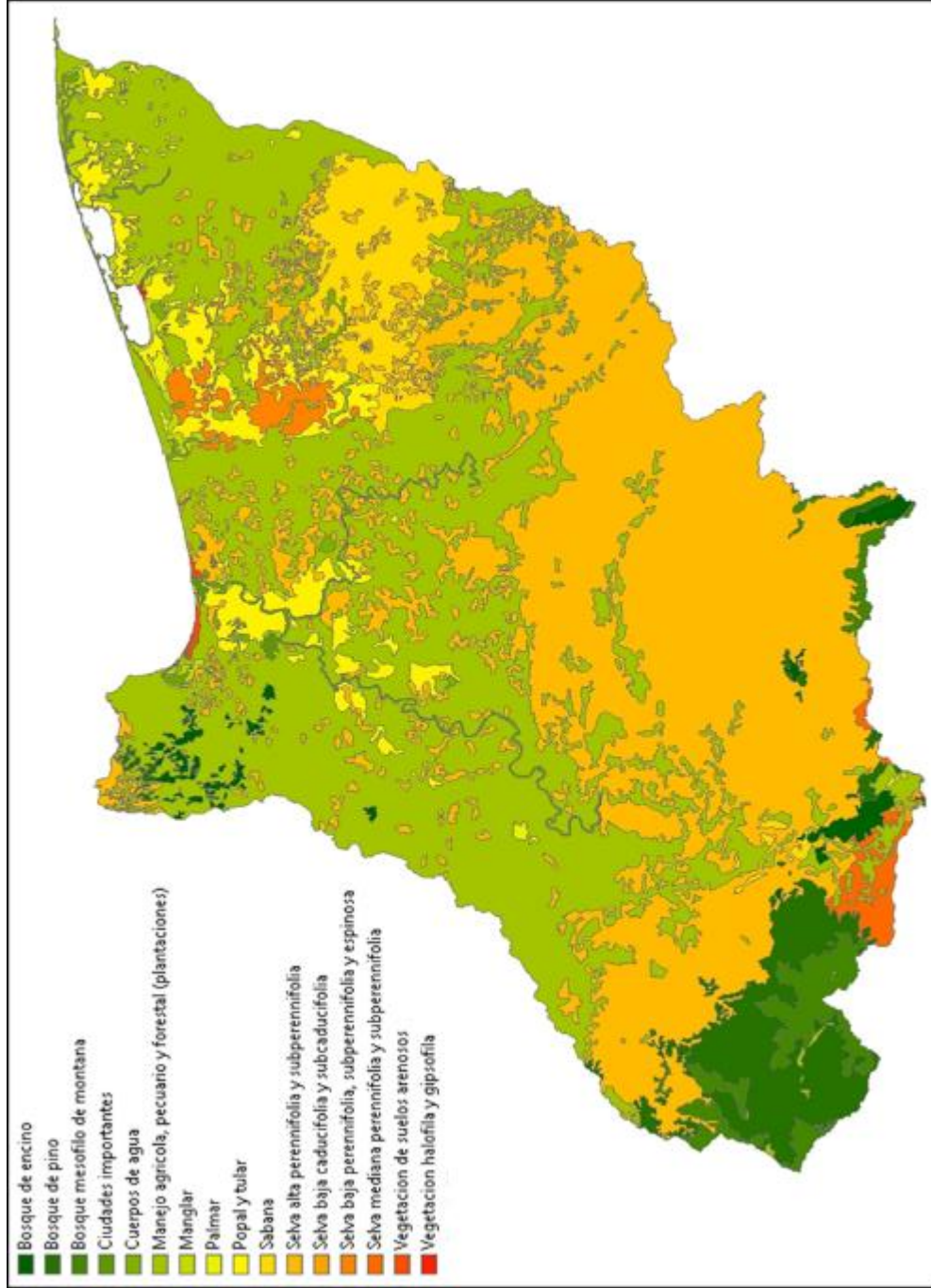


Figura 231. Uso de suelo y vegetación en la región hidrológica 29. (INEGI)

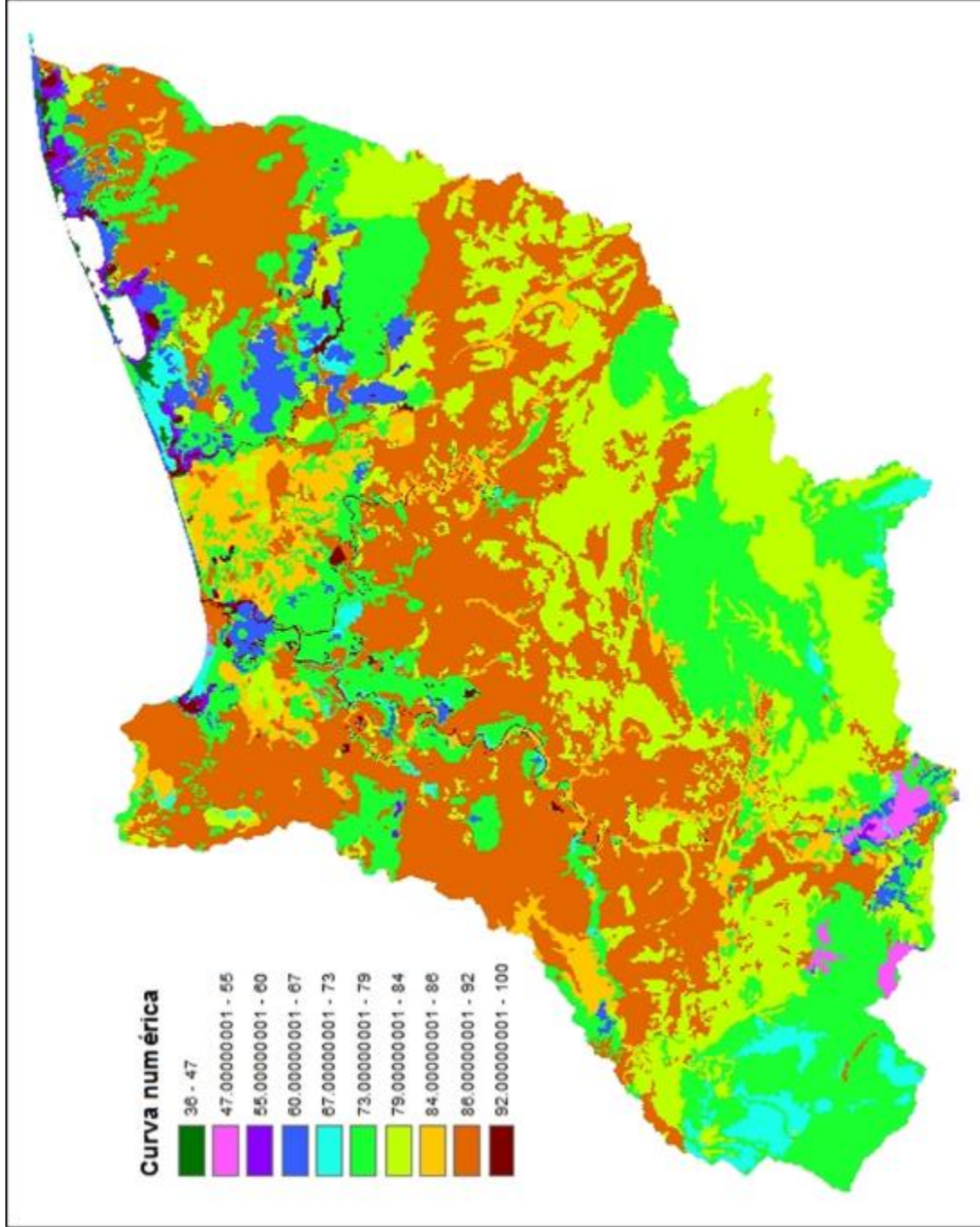


Figura 22. Mapa de Valor de Curva Numérica para la RH-29

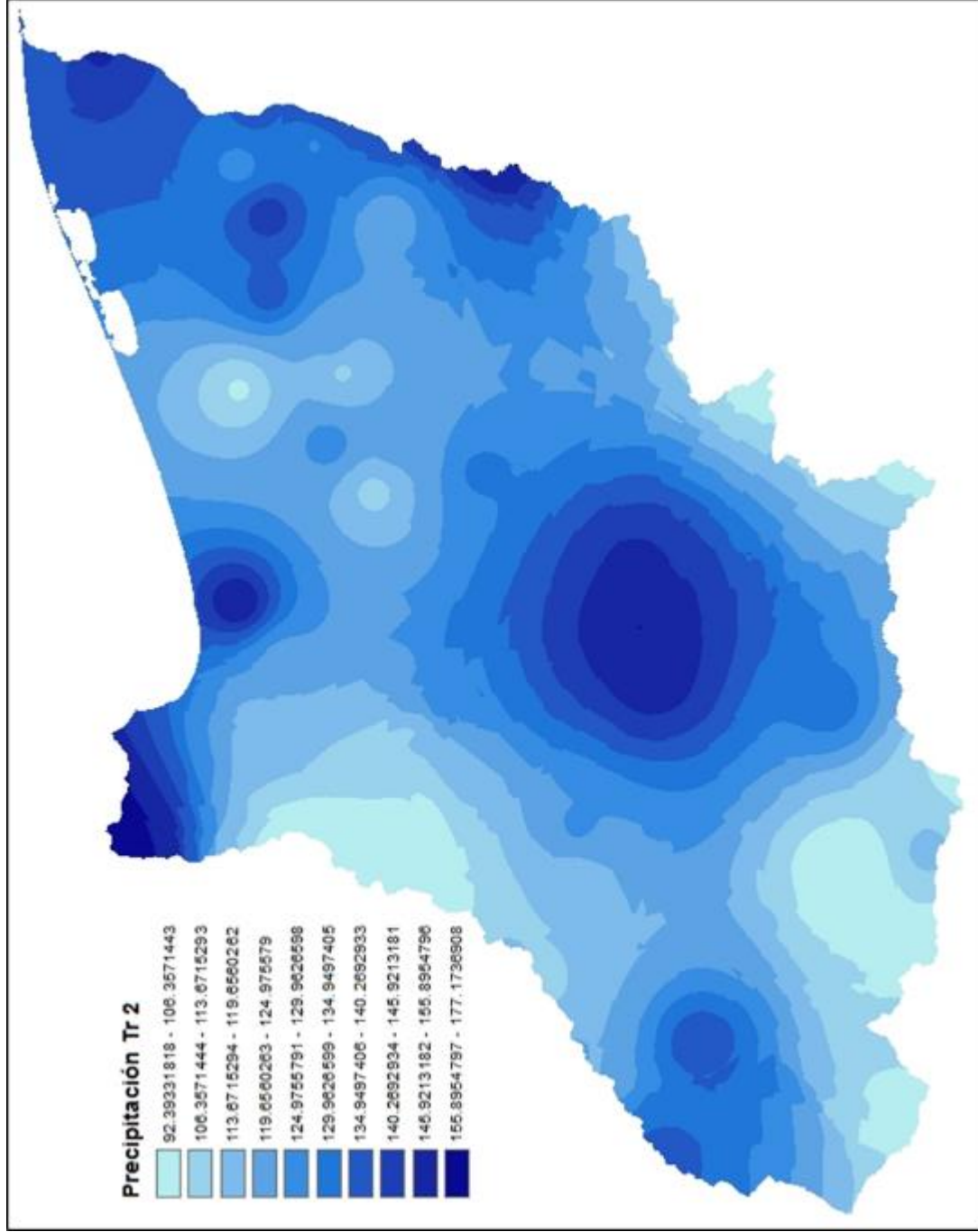


Figura 263. Precipitación asociada a un Tr de 2 años. (CONAGUA)

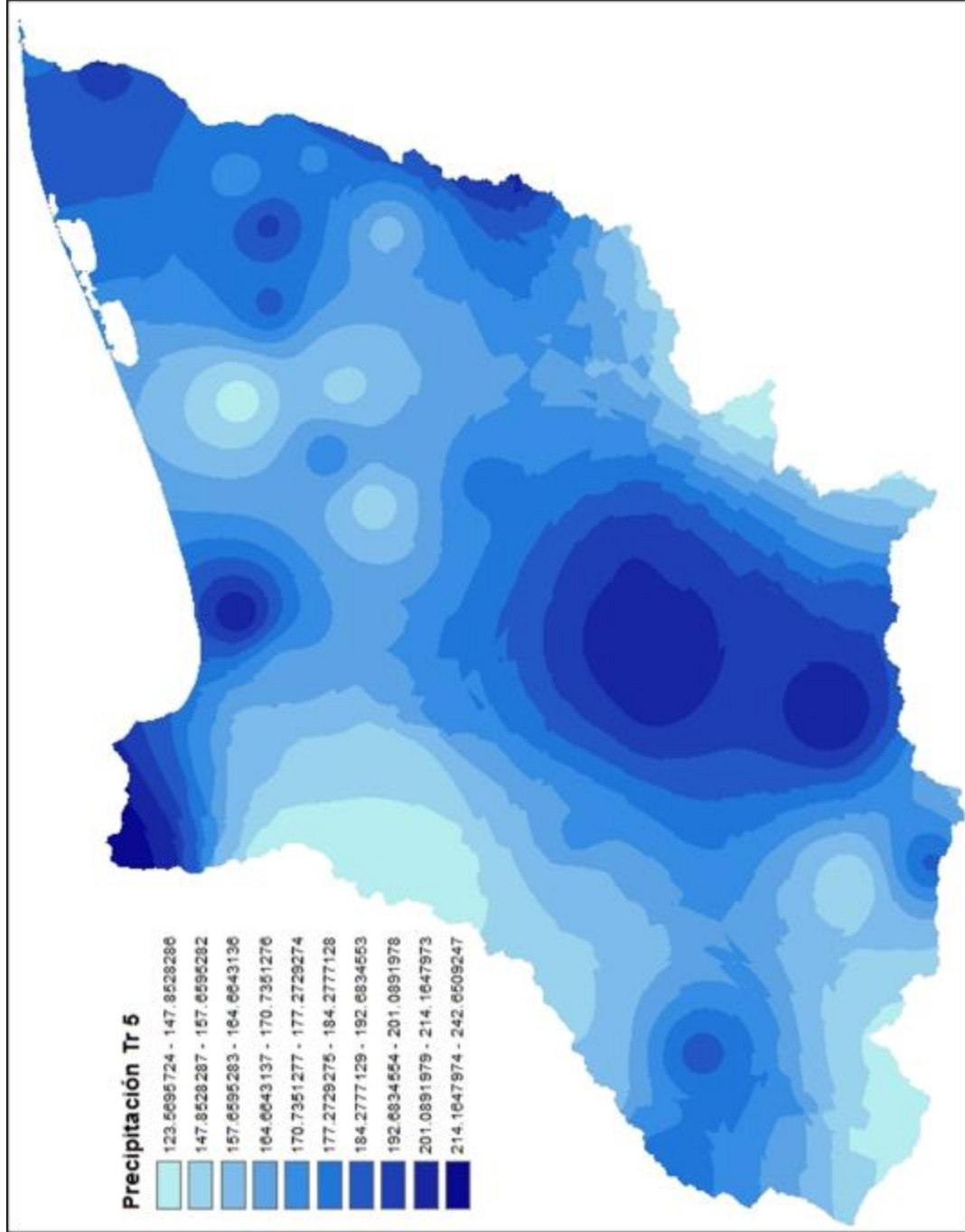


Figura 24. Precipitación asociada a un Tr de 5 años. (CONAGUA)

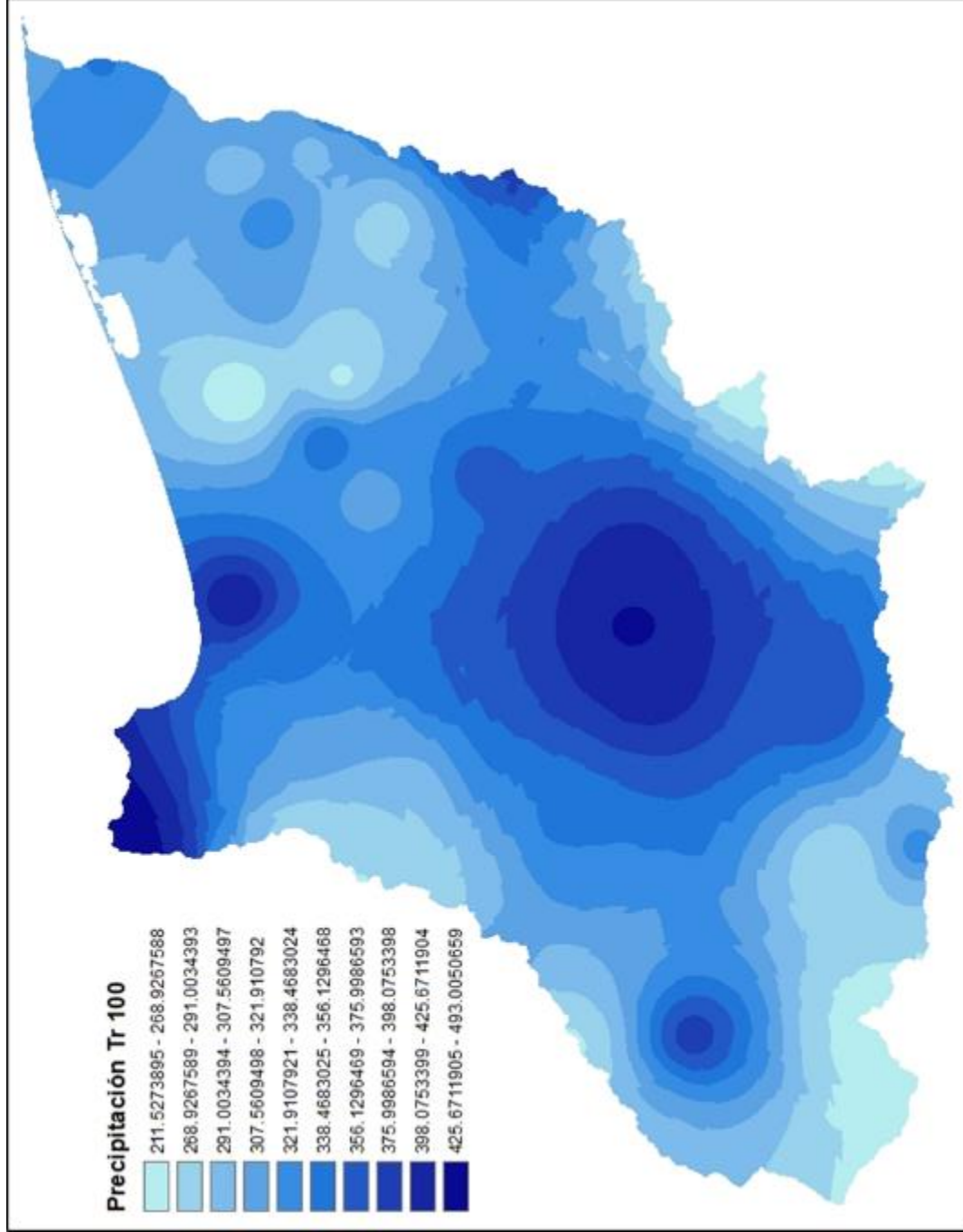


Figura 25. Precipitación asociada a un Tr de 100 años. (CONAGUA)

4.2. Generación de mapa de Dirección de Flujo.

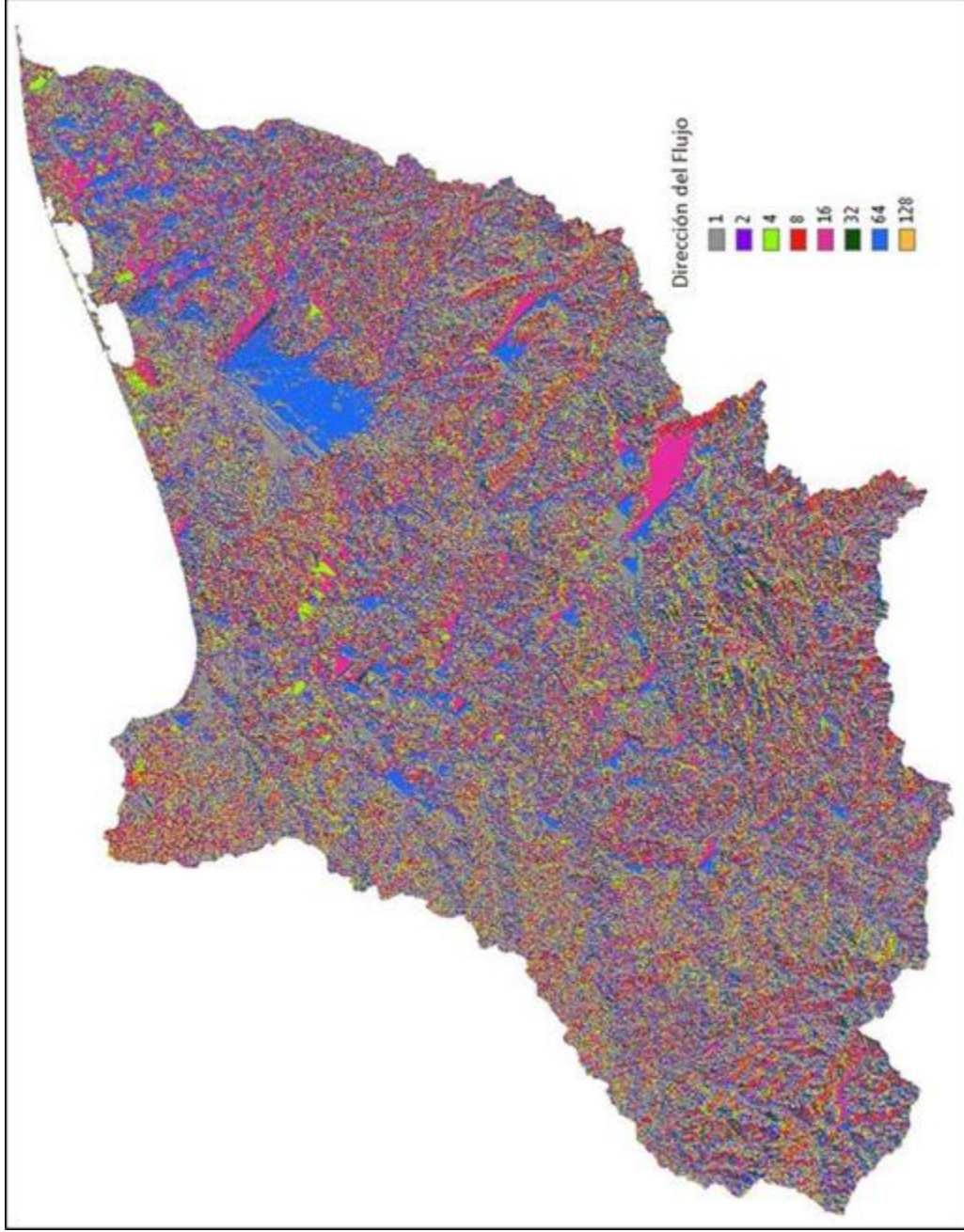


Figura 26. Mapa de dirección del flujo, para la RH-29

4.3 Generación de mapas de escurrimiento (Q).

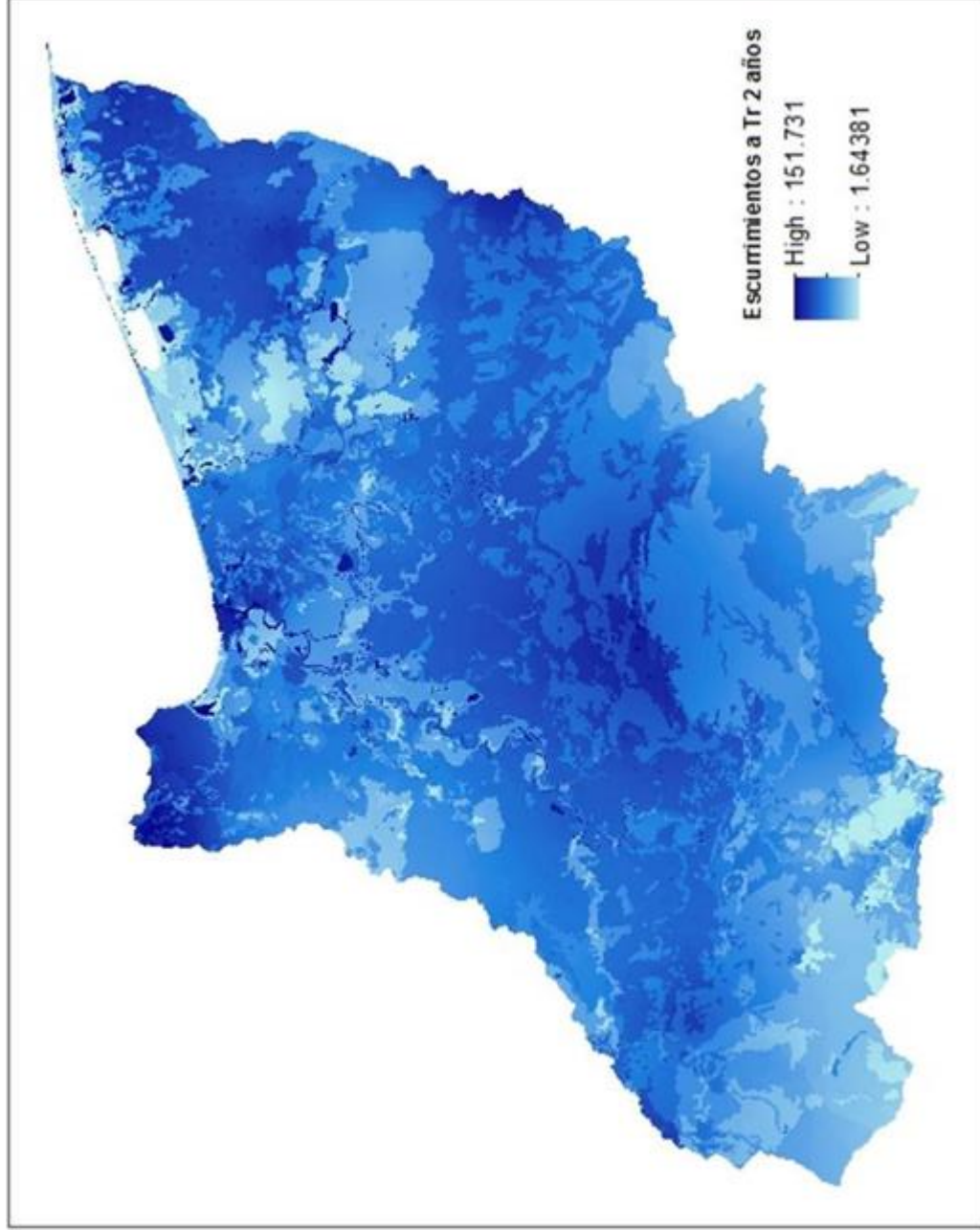


Figura 27. Escurrimiento asociado a un Tr de 2 años

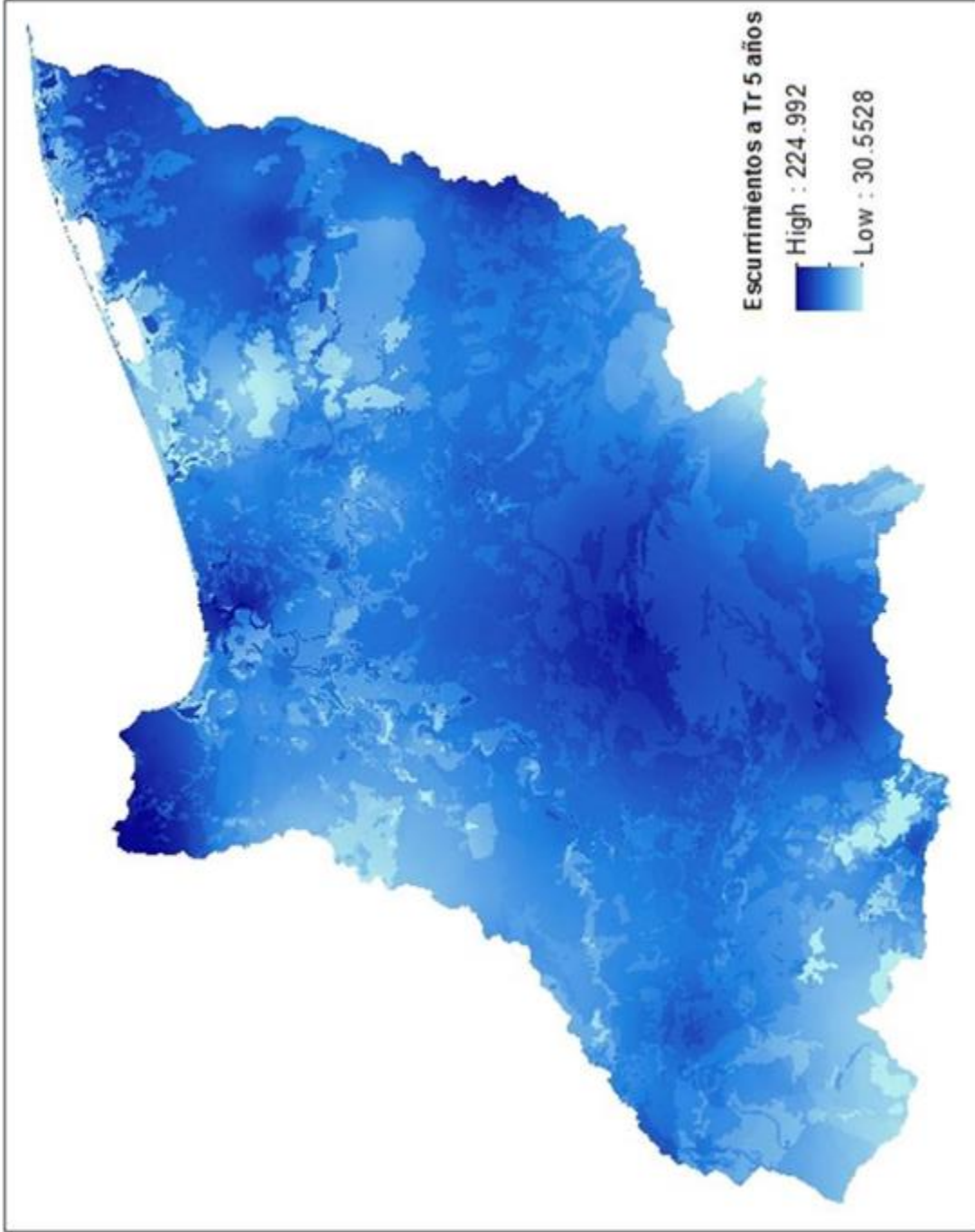


Figura 28. Escurreimiento asociado a un Tr de 5 años

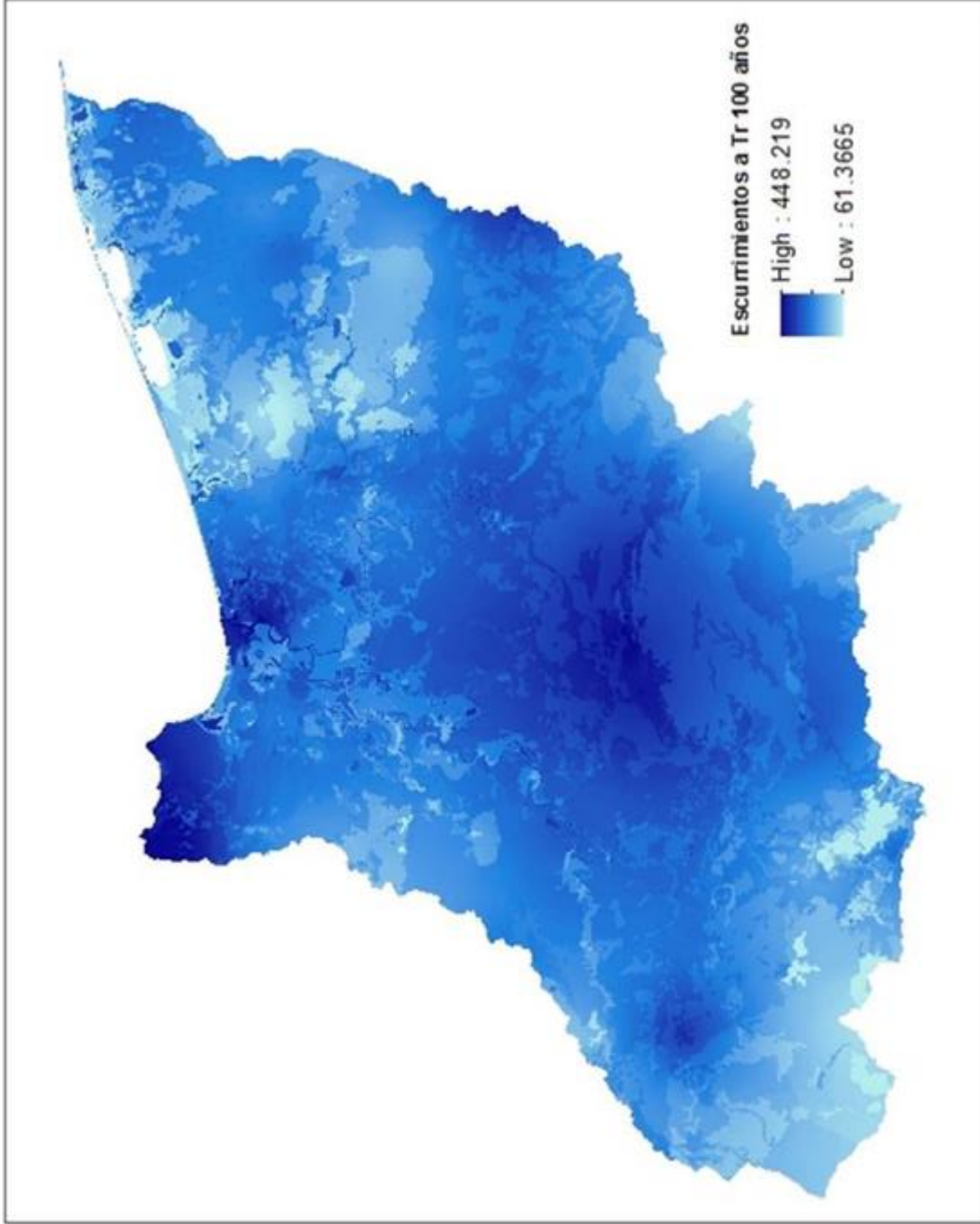


Figura 29. Escurreimiento asociado a un Tr de 100 años

4.4. Generación de mapa de Flujo Acumulado.



Figura30 Mapa de flujo acumulado para un Tr de 2 años.



Fig31. Mapa de flujo acumulado para un Tr de 5 años

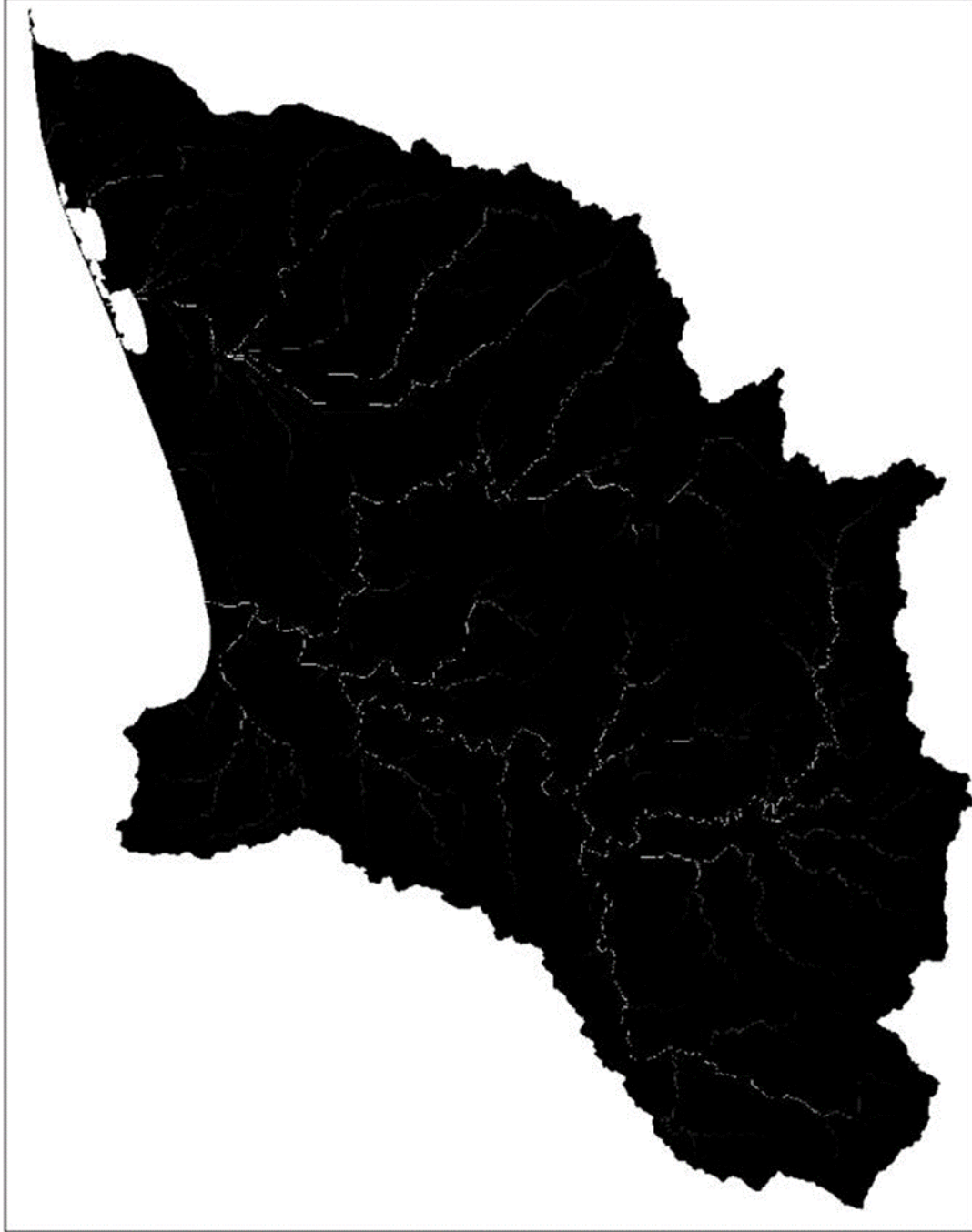


Figura 32 de flujo acumulado para un T_r de 100 años

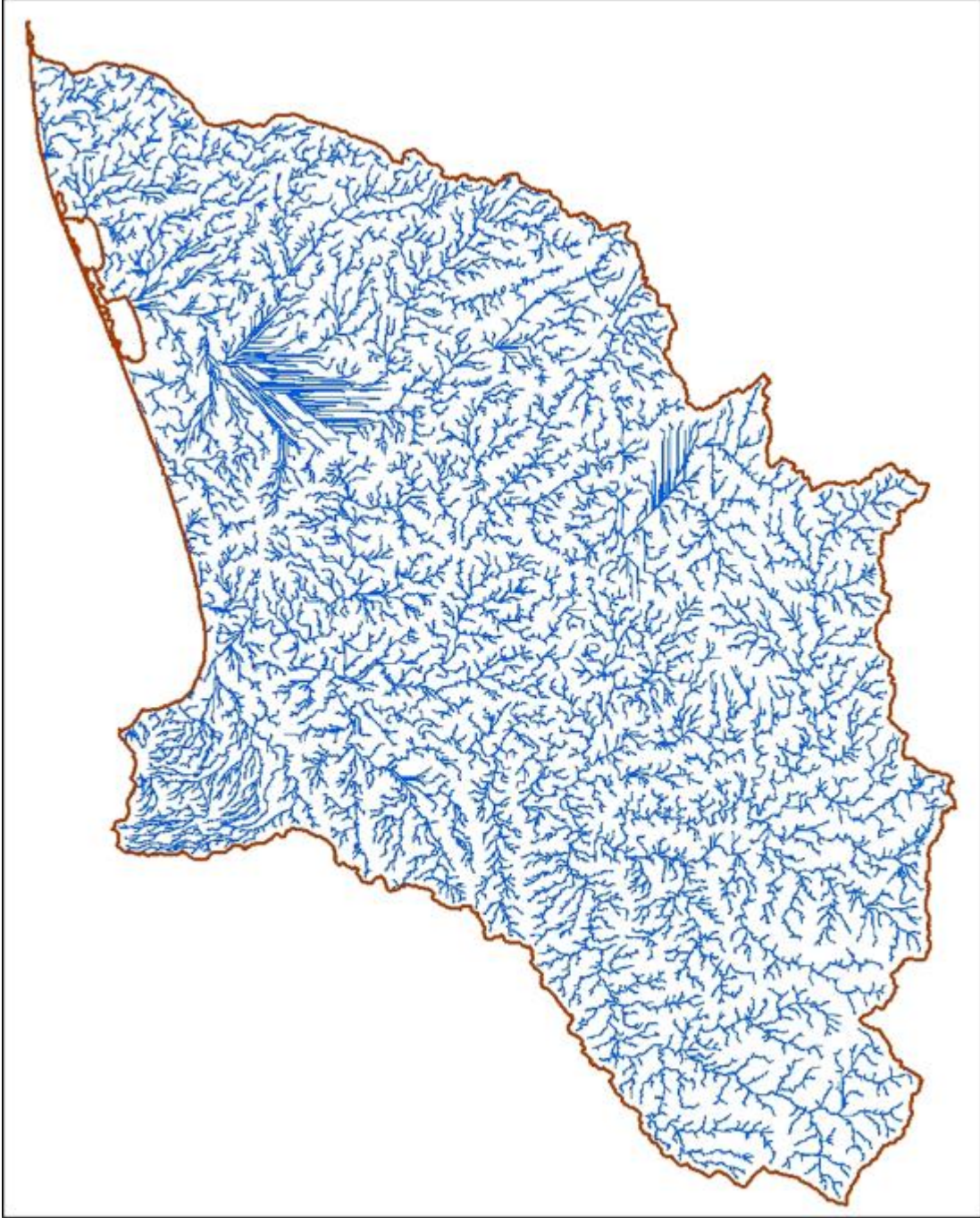


Figura 33. Red de ríos naturales de la RH-29

4.5 Generación del mapa de Índice de Inundación.

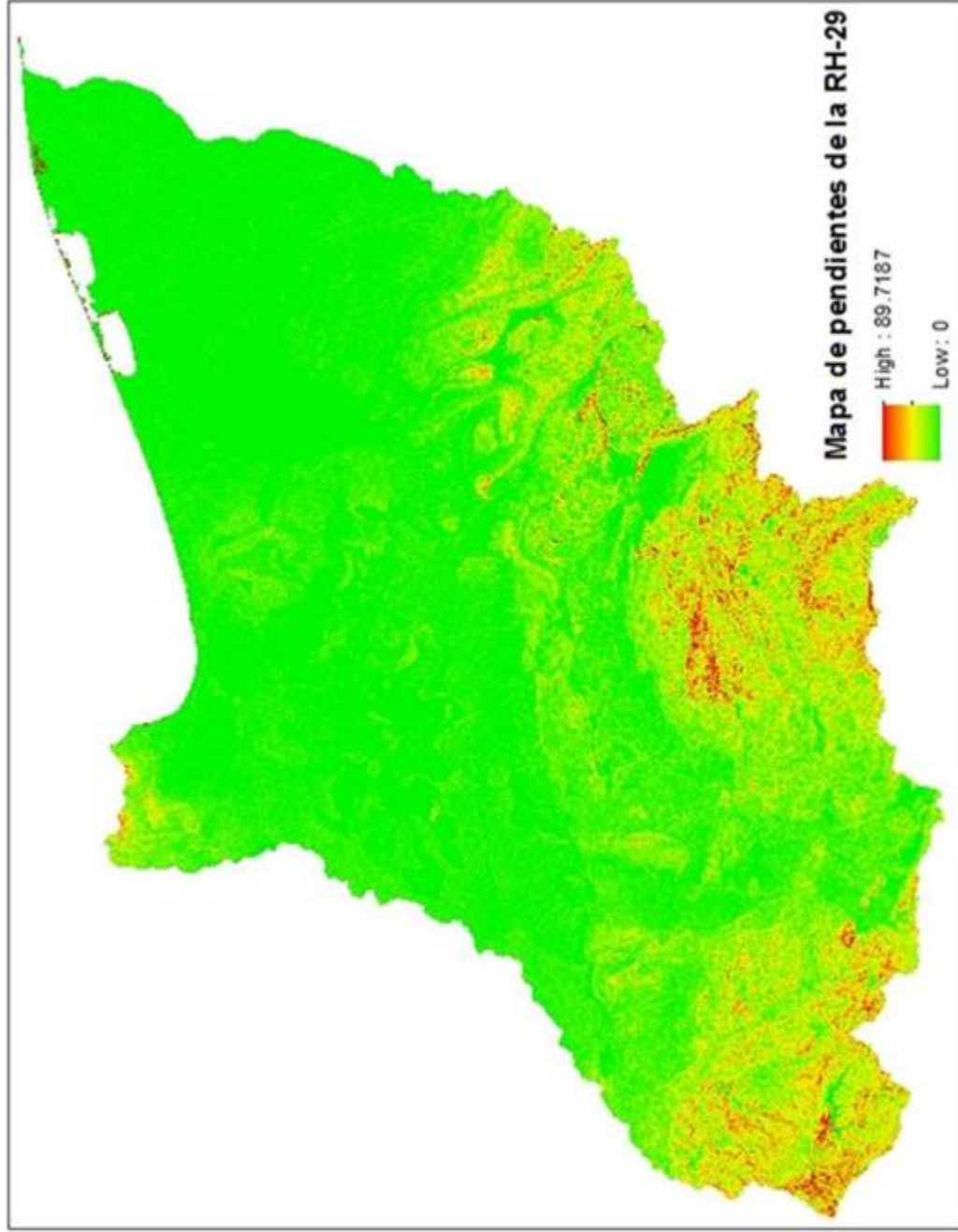


Figura 34 Mapa de pendientes para la RH-29

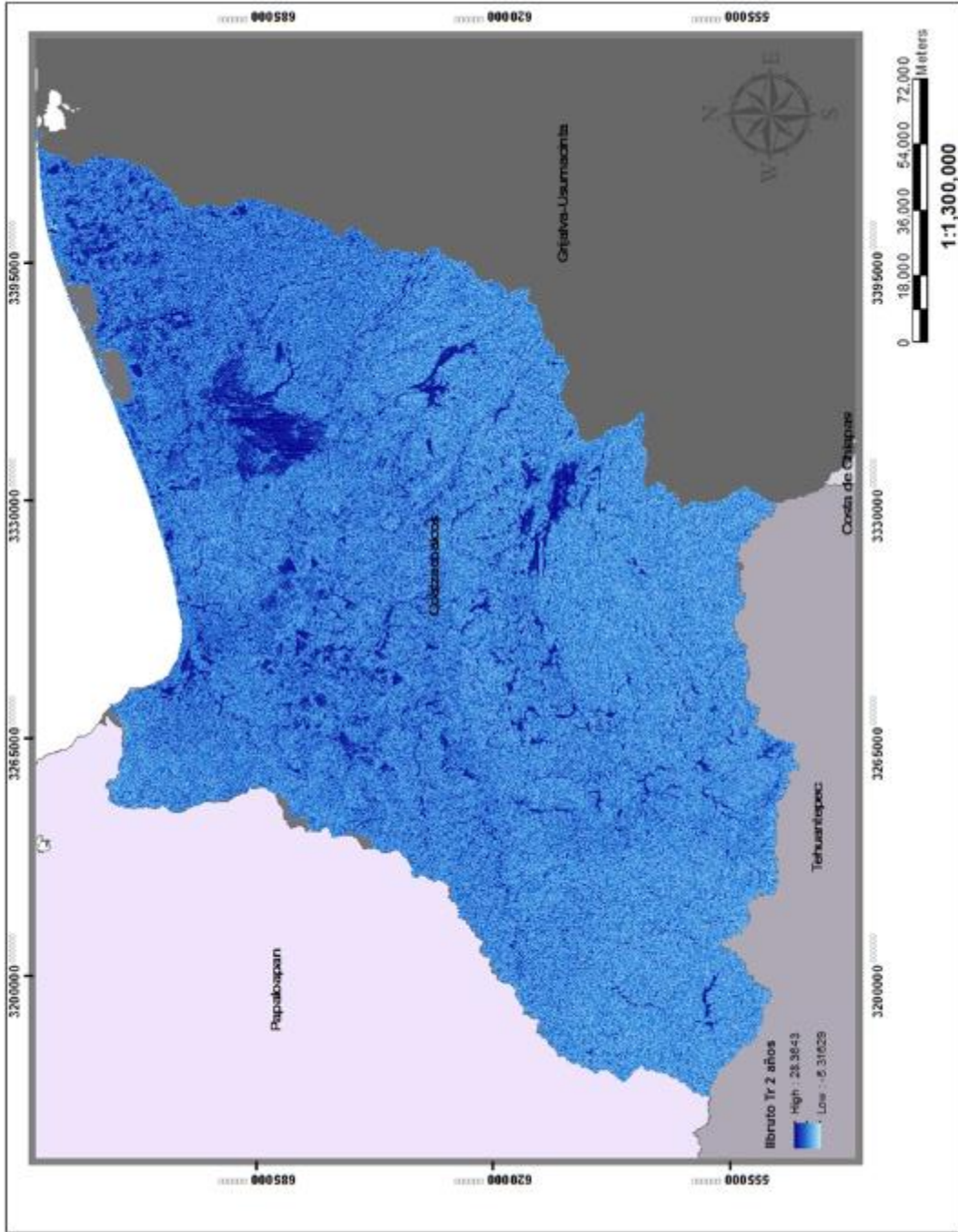


Figura 35. Cálculo del Índice de Inundación para un Tr de 2 años, sin calibrar.

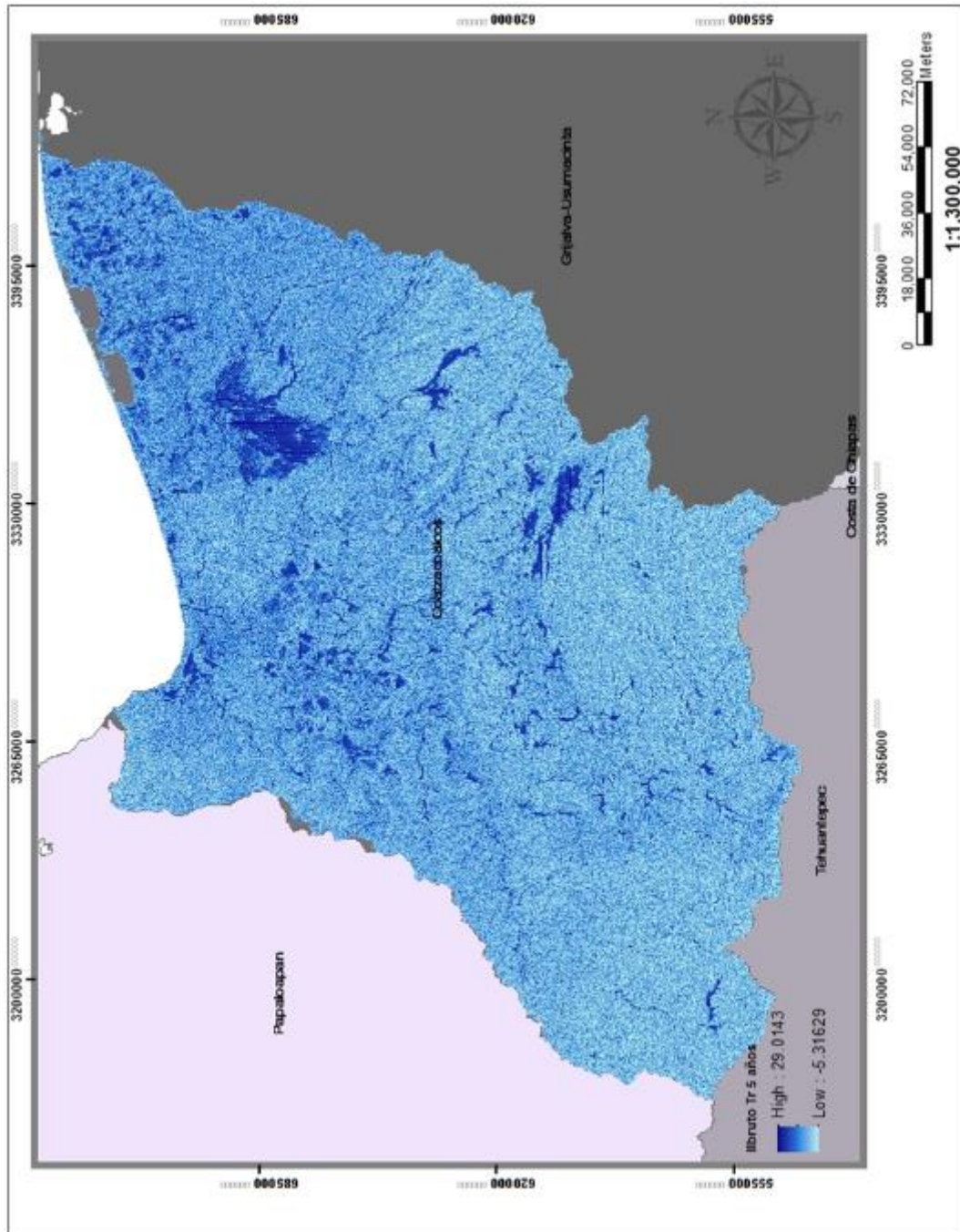


Figura 36. Cálculo del Índice de Inundación para un Tr de 5, sin calibrar

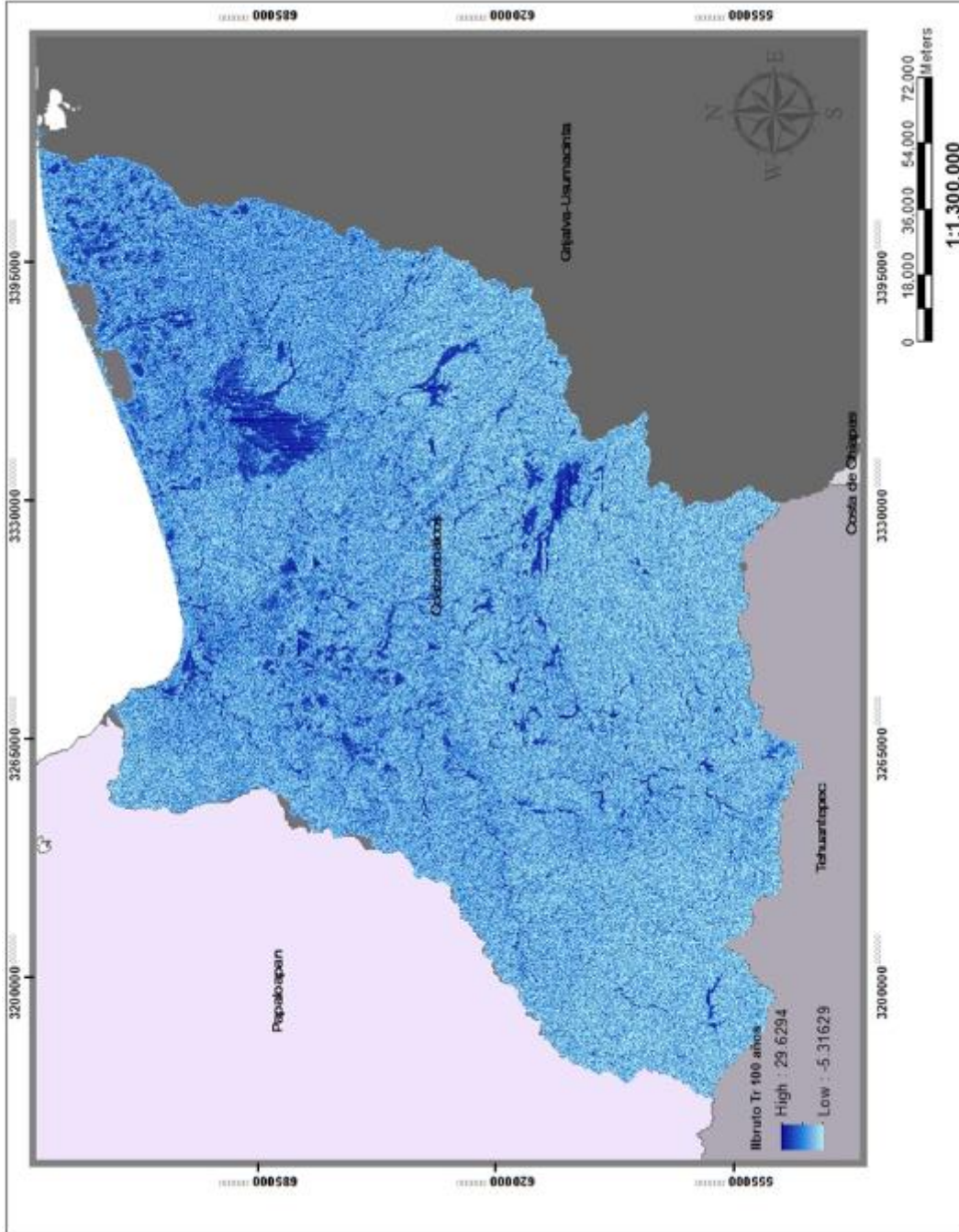


Figura 41. Cálculo del Índice de Inundación para un Tr de 100, sin calibrar

4.6 Calibración de mapas de índice de inundación.

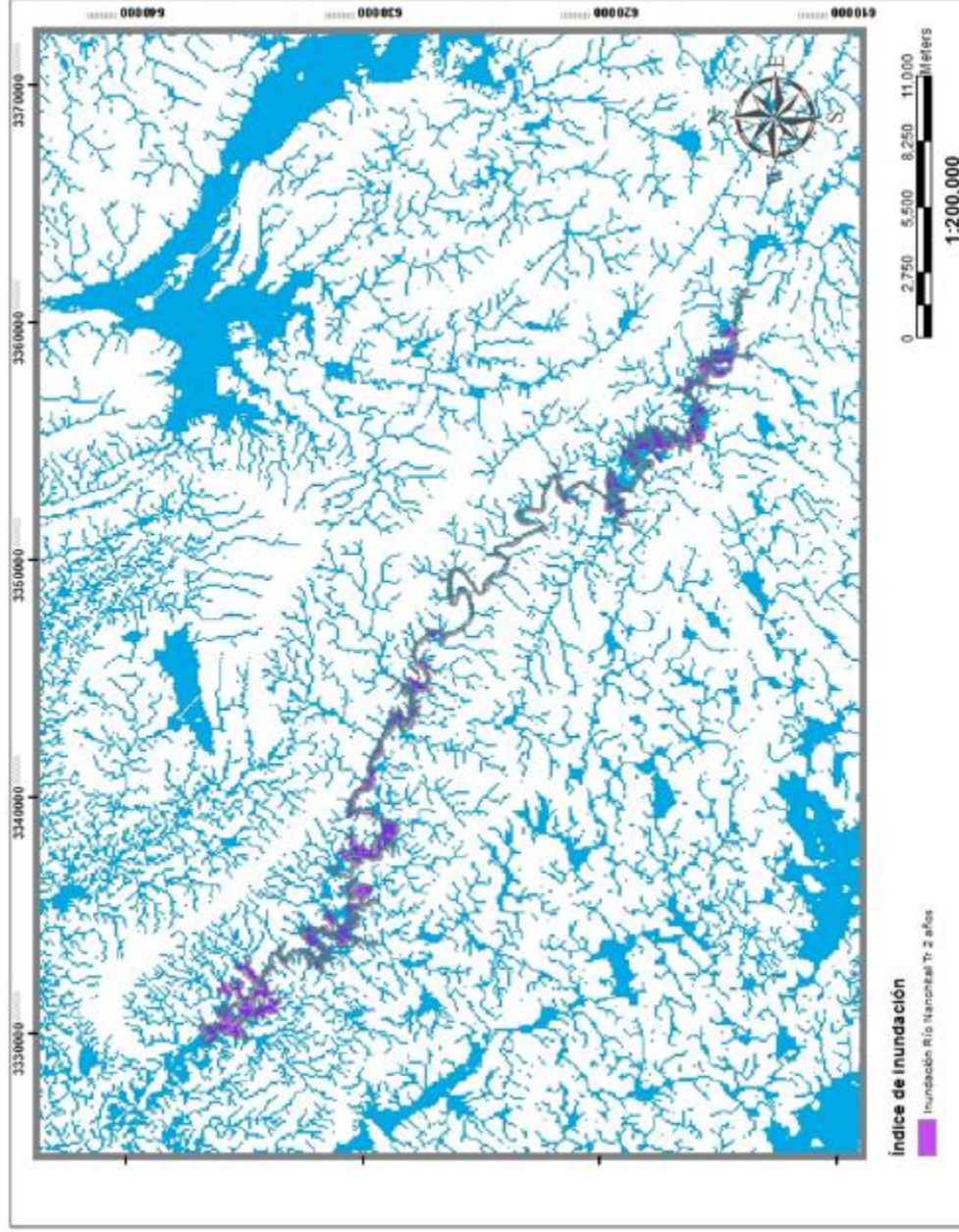


Figura 38. Mapa del modelo de Índice de Inundación con Tr de 2 años sobre el río Nanchital

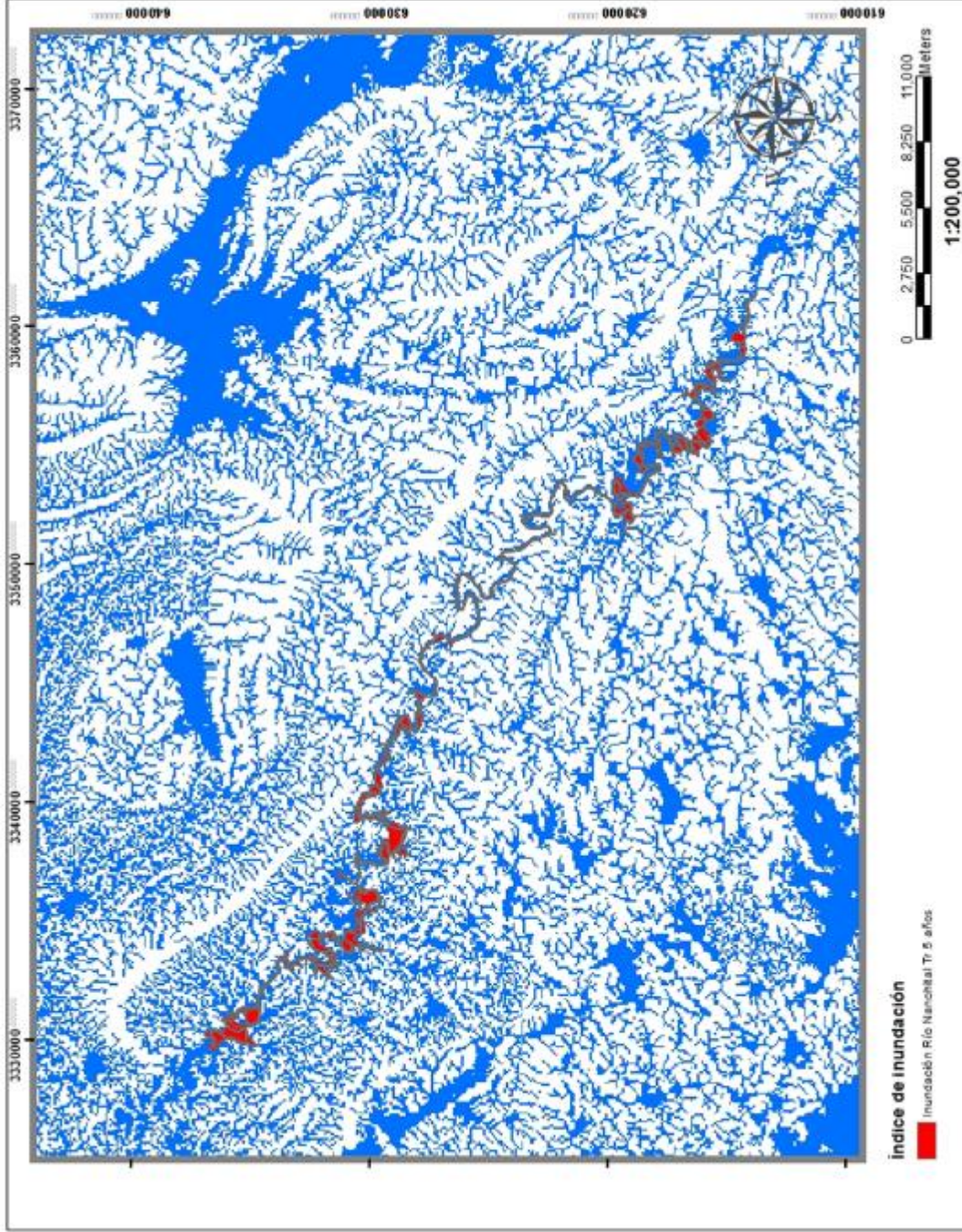


Figura 39. Mapa del modelo de Índice de Inundación con Tr de 5 años sobre el río Nanchital

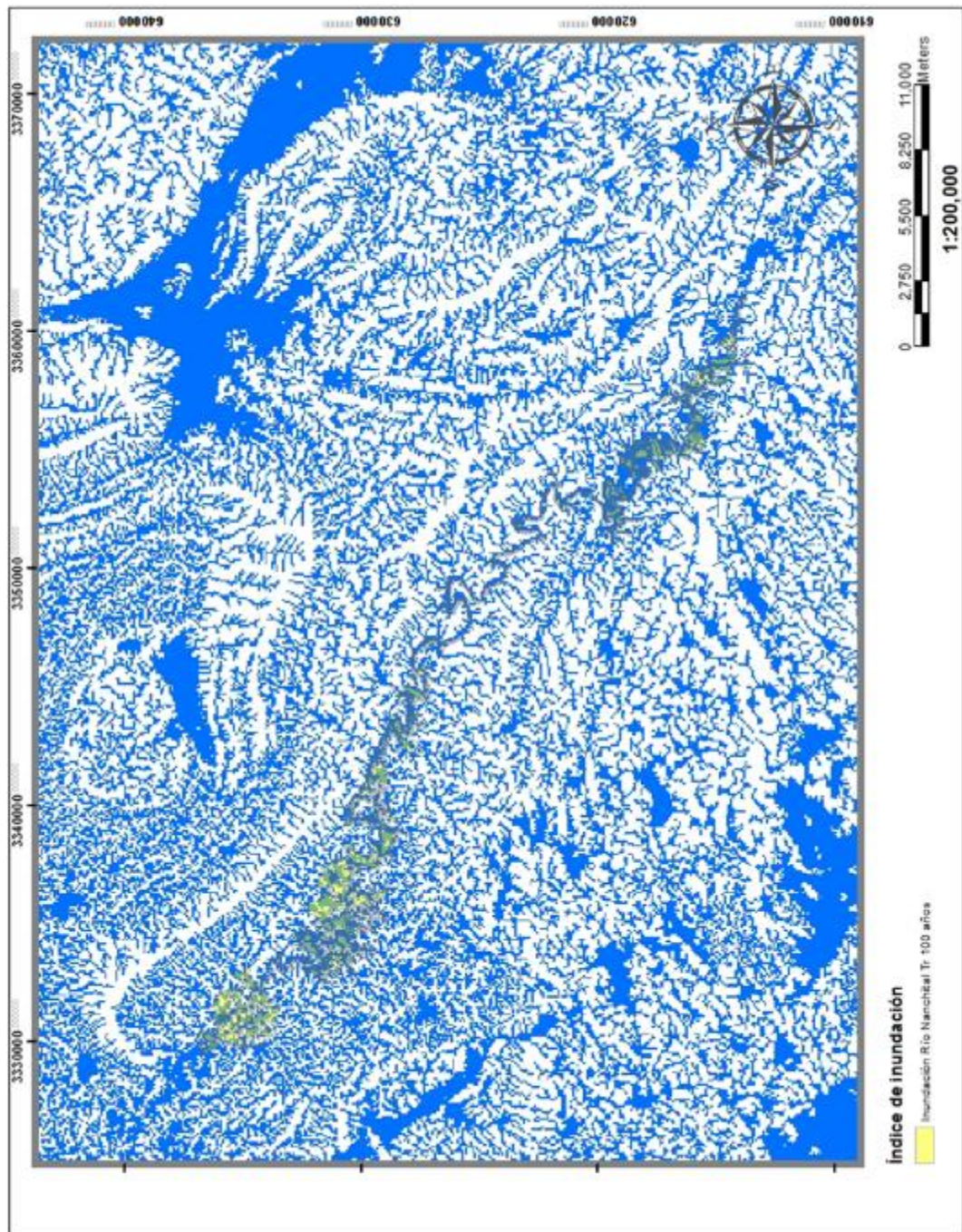


Figura 40. Mapa del modelo de Índice de Inundación con Tr de 100 años sobre el río Nanchital.

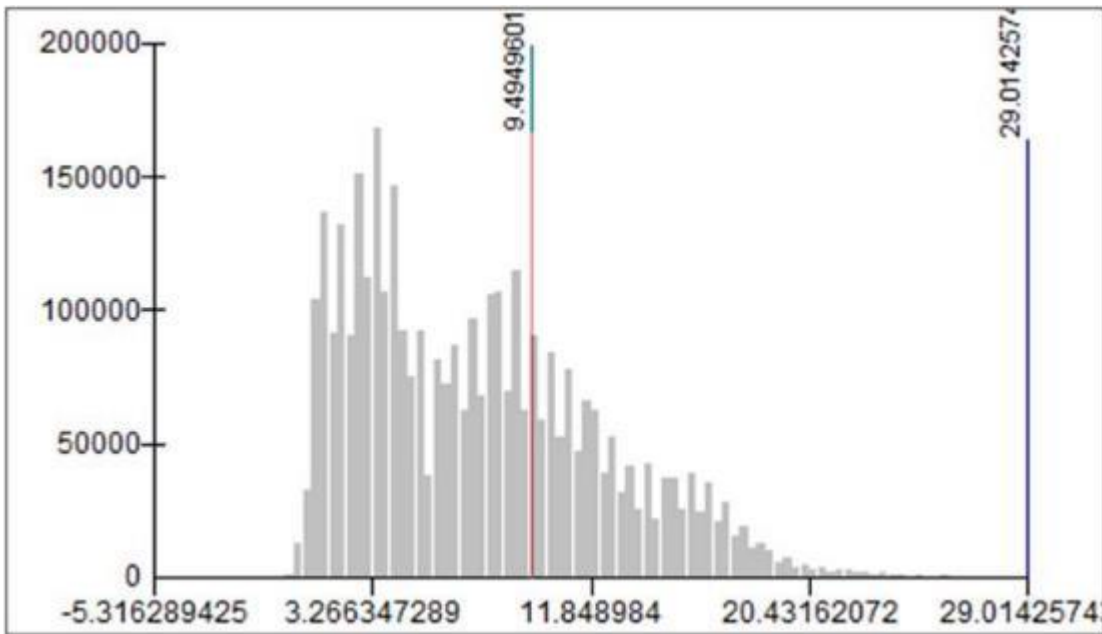


Figura 41. Histograma de calibración del Índice de Inundación para un Tr de 5 años.

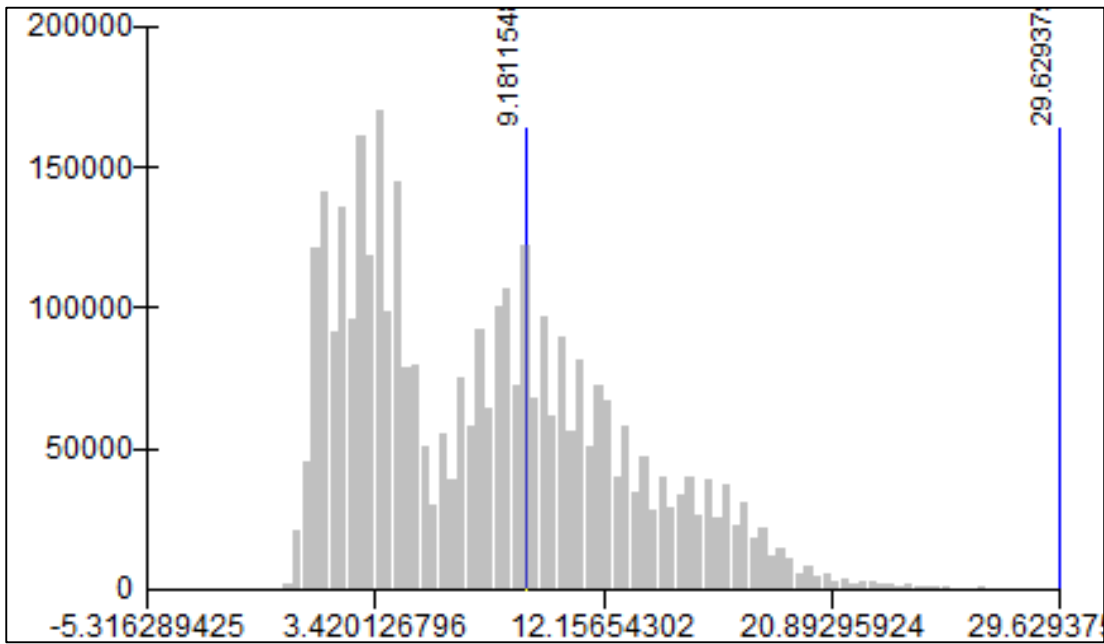


Figura 42. Histograma de calibración del Índice de Inundación para un Tr de 100 años.

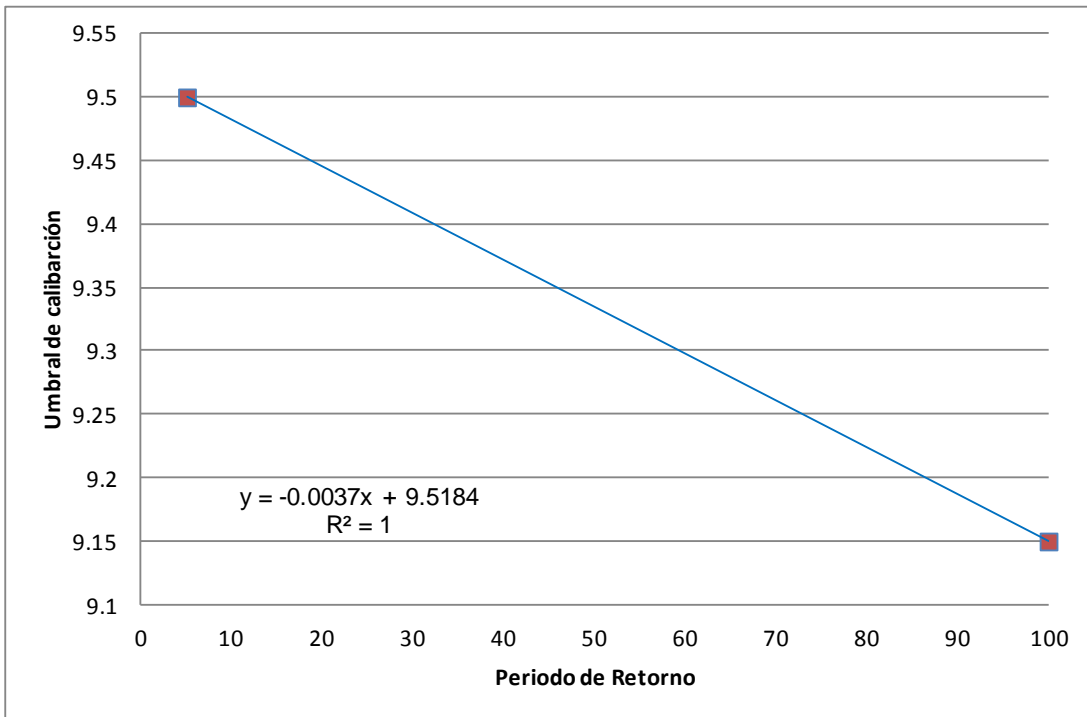


Figura 43. Análisis de regresión lineal

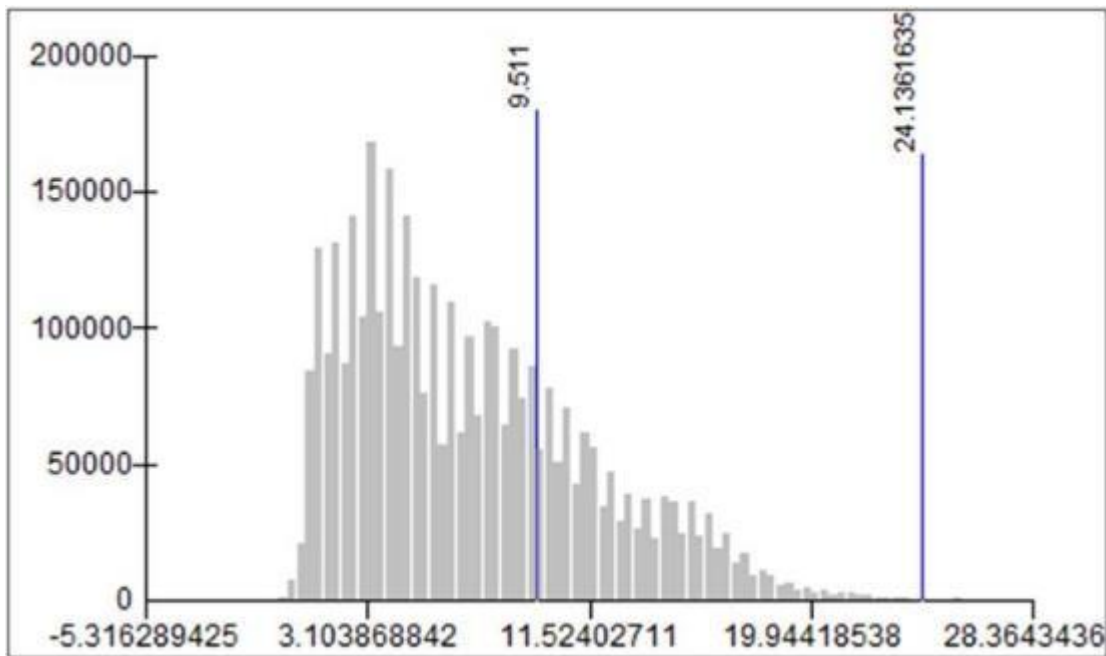


Figura 44. Histograma de calibración del Índice de Inundación para un Tr de 2 años.

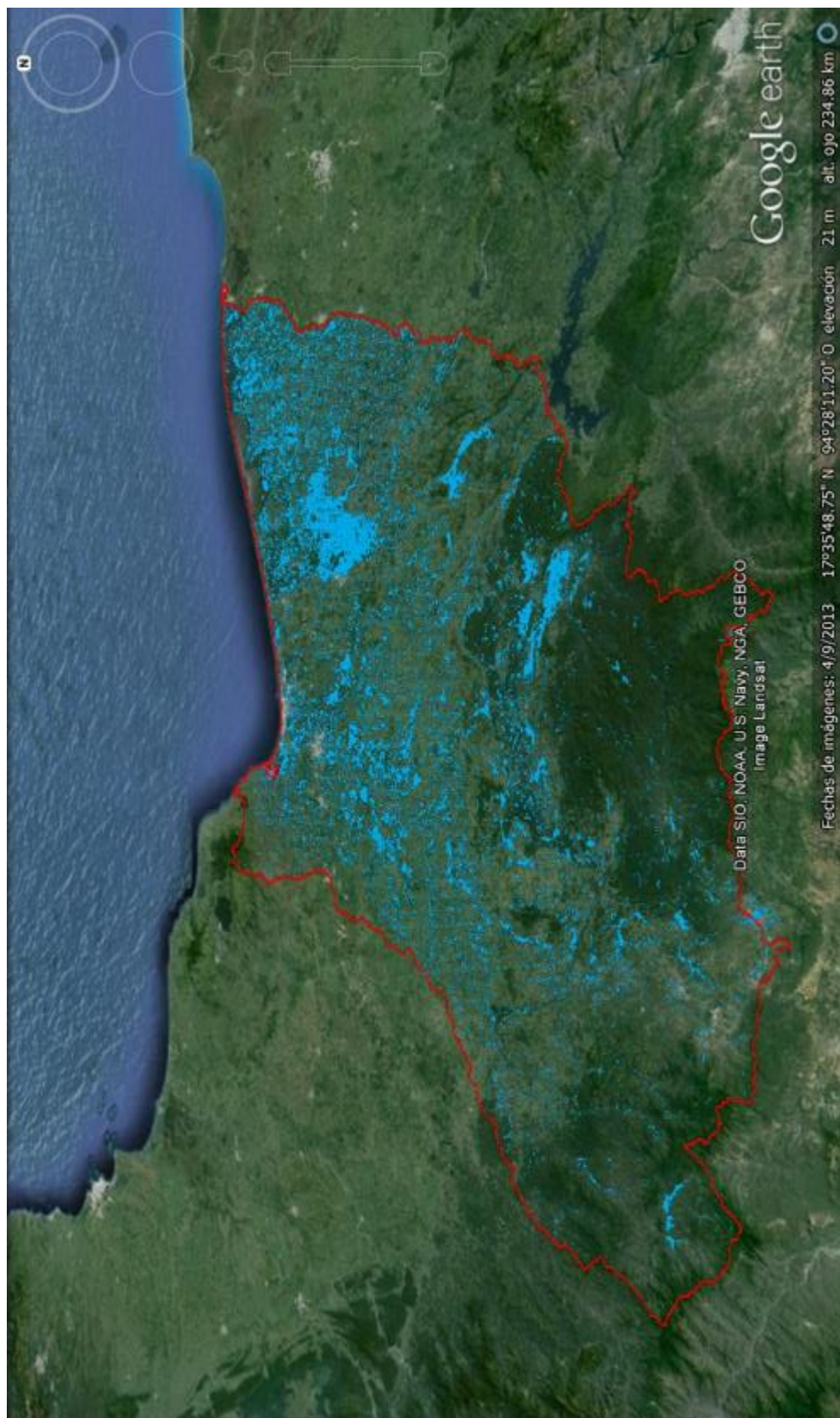


Figura 45. Zonas susceptibles de ser inundadas con una superficie mayor a 20 Ha en la RH-29 para un Tr de 2 años.

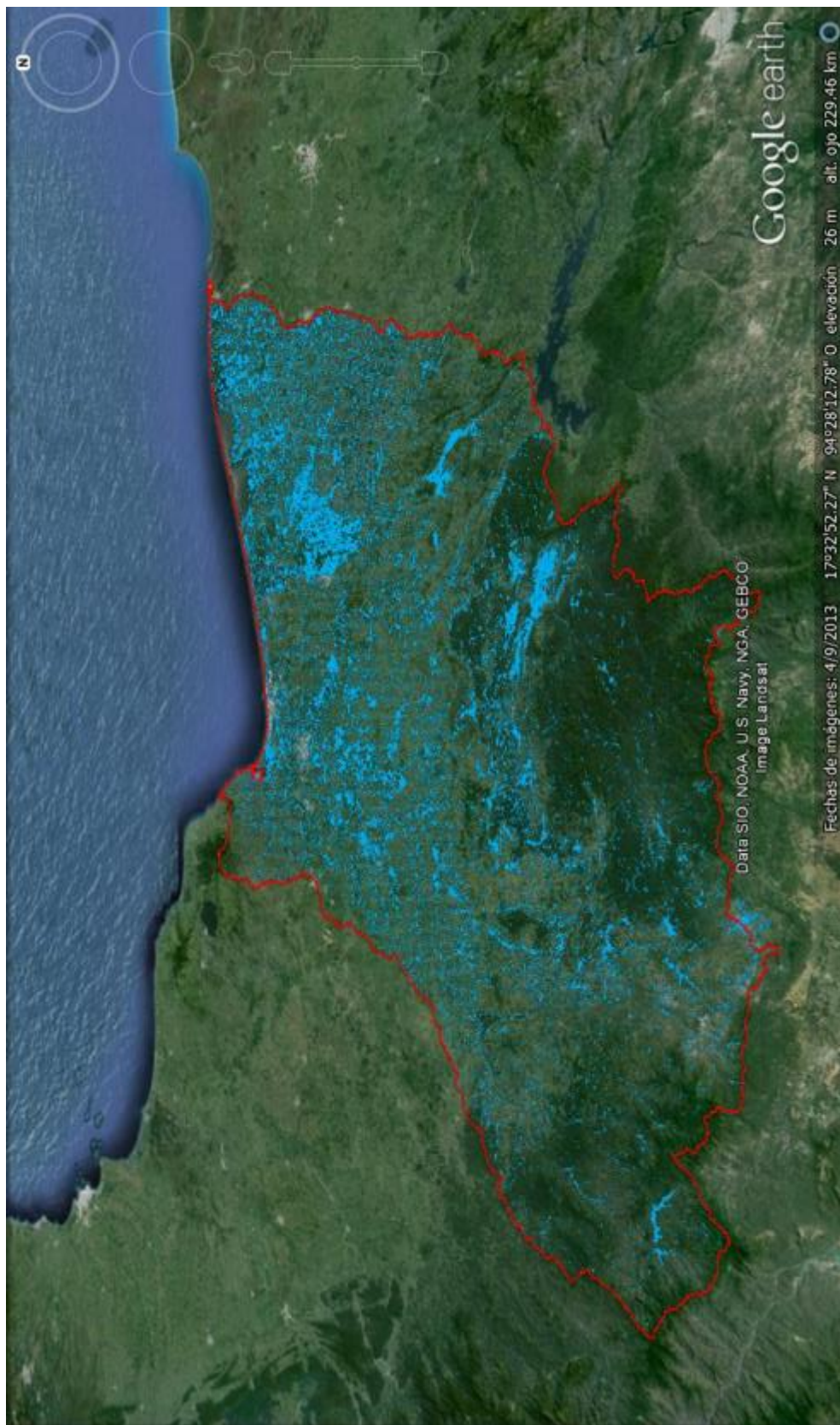


Figura 46. Zonas susceptibles de ser inundadas con una superficie mayor a 20 Ha en la RH-29 para un Tr de 5 años.

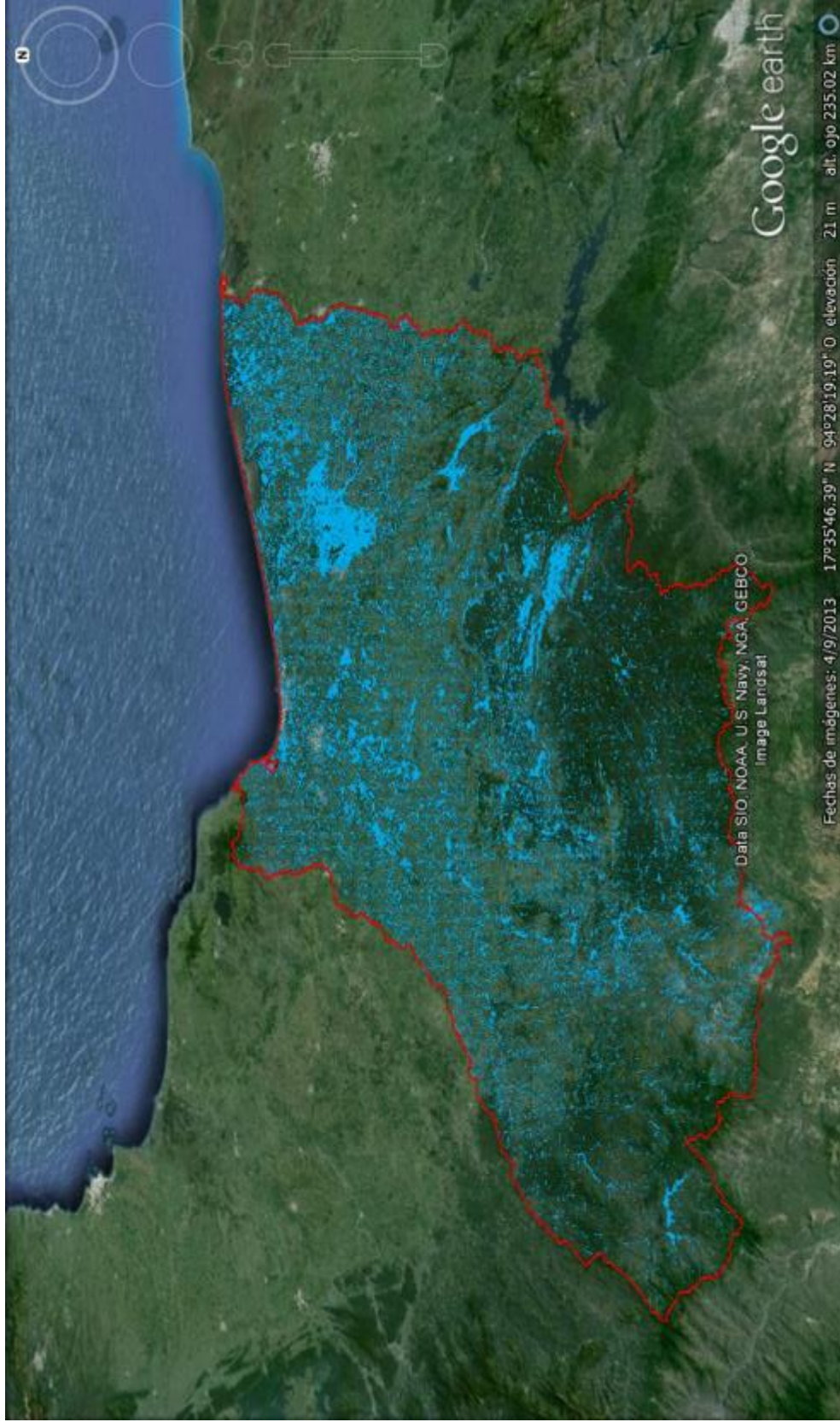


Figura 47. Zonas susceptibles de ser inundadas con una superficie mayor a 20 Ha en la RH-29 para un Tr de 100 años.

5. DISCUSIÓN

5.1 Recopilación de información

Distribución de la precipitación media anual.

En este mapa se observa que los estados que presentan mayor precipitación media anual superan los 1,000 mm al año, entre los cuales se encuentran Veracruz, Yucatán, Chiapas y pequeñas porciones de los estados de Michoacán y Sinaloa. En el caso del área de estudio, la Región Hidrológica N°29 (Río Coatzacoalcos), se observa que la precipitación media anual varía de los 1,001 a los 2,000 mm al año y solo una pequeña región situada al oeste supera dicha precipitación (Figura 18).

Modelo digital de elevaciones.

Como ha sido mencionado en la metodología, para el manejo de la información se utilizó un Sistema de Información Geográfica (SIG), así como el Modelo Digital de Elevaciones (MDE) a nivel nacional. Para el presente análisis se decidió utilizar el DEM de SRTM, el cual tiene una resolución de 90m. Por lo tanto, en la Figura 19, se puede observar que de acuerdo al DEM, la elevación mínima es de -9 msnm, la cual corresponde a la parte baja de la región hidrológica donde se encuentran la desembocadura de cauces. Esta se puede identificar con la tonalidad verde en las regiones Este y Centro de la RH N°29 (Río Coatzacoalcos). Por otro lado, se observa que las partes más altas se localizan en la región Sur con elevaciones de hasta 2,318 msnm y en ellas se ubica la zona serrana de los estados de Oaxaca y Veracruz.

Edafología.

La edafología característica de las zonas con menor altitud de la Región Hidrológica N°29 Coatzacoalcos se caracteriza por mantener una predominancia de los suelos gleysol, acrisol y luvisol, los cuales se caracterizan por ser parte de las zonas pantanosas de los estados de Oaxaca de Veracruz, así como tener vegetación de selva o bosque. En cuanto a la zona cerril de la RH N°29 se observa una predominancia de los suelos Feozem, litosol y acrisol. Los suelos antes mencionados

se caracterizan por presentarse en las sierras de México, así como en barrancos y lomeríos. El aprovechamiento de estos suelos depende de la vegetación que esté presente en la zona. (Figura 20)

Uso de suelo y vegetación.

El uso de suelo y vegetación predominante en la Región Hidrológica N°29 “Coatzacoalcos” en las zonas bajas es de tipo manejo agrícola, pecuario y forestal, así como la selva baja perennifolia, subperenenifolia y espinosa, por lo cual es fundamental prestar atención a los centros de población predominantes en la zona, así como su crecimiento. En las partes más altas de la región se observa vegetación de suelos arenosos, agrícola y forestal (Figura 21).

Precipitación asociada a un Tr de 2 años.

En la Figura 23 se puede observar que la mayor concentración de precipitación en el área de estudio se localiza en la zona centro de la Región Hidrológica N°29 (Coatzacoalcos), con precipitaciones cercanas a los 156 mm, así mismo, se observan precipitaciones superiores a los 170 mm al noreste del área de estudio. Por otro lado, la concentración pluvial mínima se encuentra en pequeñas porciones en las zonas este, oeste y suroeste de la Región Hidrológica Número 29.

Precipitación asociada a un Tr de 5 años.

Al igual que en los eventos que pudieran suscitarse en un periodo de retorno de dos años, las regiones que presentan una posible mayor afectación en un periodo de cinco años, son las zonas del norte y centro, sin embargo; a diferencia de los eventos suscitados en un Tr de 2 años, se observa que el rango de magnitudes de precipitación es mayor, ya que este asciende en sus regiones más propensas a los 242.65 mm. Así mismo, en este tipo de eventos las zonas de afectación se ven más extensas (Figura 24).

Precipitación asociada a un Tr de 100 años.

A diferencia de los eventos antes descritos, se puede observar que tratándose de los eventos asociados a un Tr de 100 años, las zonas que presentan mayor afectación son las del norte y centro, con una precipitación que va de los 425.67 a los 493.00 mm. En las demás regiones se observa una diferencia considerable de precipitación, sin embargo; es importante mencionar que el rango de precipitaciones para este periodo de retorno es superior a los de 2 y 5 años (Figura 25).

5.2 Mapa de dirección de flujo de la RH N°29 (Río Coatzacoalcos).

Como se mencionó en la presente metodología, el flujo de precipitación puede tomar diferentes direcciones, basándose en la topografía, edafología, uso de suelo y vegetación, por lo cual; para el área de estudio designada, existen ocho direcciones distintas en las que el flujo se puede conducir, por lo que de forma significativa se observa que en la región noreste la dirección predominante de traslado es el norte, mientras que al sur de la Región Hidrológica, se observa un mayor flujo en dirección oeste (Figura 26).

5.3 Mapa de escurrimiento de la RH N°29 (Río Coatzacoalcos).

Escurrimiento asociado a un Tr de 2 años.

Los eventos asociados a un tiempo de retorno de dos años tienden a presentar un mayor escurrimiento en los límites de la Región Hidrológica N° 29, de forma sobresaliente en las zonas norte, sureste y de forma esporádica en el centro y este. Por otro lado, las zonas con menor escurrimiento se localizan en las regiones suroeste, sur y noreste del área de influencia, esto puede ser identificado en la Figura 27.

Escurrimiento asociado a un Tr de 5 años.

A diferencia de los escurrimientos que pueden llegar a presentarse en un tiempo de retorno de dos años, los escurrimientos asociados a un Tr de cinco años presentan un rango de precipitaciones superior, pues este va de los 30.55 a los 224.99mm. Con

base a lo previamente descrito, las zonas en las que se observa un mayor escurrimiento son el norte, suroeste y este del área de influencia, mientras que las que alojan una menor precipitación son el oeste y pequeñas porciones del este. Es importante mencionar que en estos eventos se observa una mayor influencia de los eventos de precipitación en comparación con los escurrimientos asociados a un Tr de dos años (Figura 28).

Escurrimiento asociado a un Tr de 100 años.

Al igual que los eventos antes descritos (escurrimientos asociados a un Tr de dos y cinco años respectivamente), los eventos que se pudieran suscitar en un tiempo de retorno de cien años presentan un comportamiento en el que la mayor cantidad de precipitación se encuentra focalizada en el noreste y centro del área de influencia, mientras que las zonas con menor indicios de precipitación se localizan al sur de la Región Hidrológica N°29, sin embargo, la magnitud de las zonas de afectación es considerablemente más pequeña (Figura 29).

5.4 Mapa de escurrimiento acumulado de la RH N°29 (Río Coatzacoalcos).

Para el análisis de los mapas dentro de este apartado, se realizó una comparación con la red de ríos naturales de la Región hidrológica 29 (Figura 33)

Escurrimiento acumulado asociado a un Tr de 2 años.

En este mapa (Figura 30) se puede observar que la acumulación de todos los flujos del área de estudio se concentran en un cauce principal, el cual se localiza en la región norte de la RH N°29, a lo largo de la misma, en donde la dirección con la cual se conduce dicho flujo es de Suroeste a Nor-Noreste, para su desembocadura en el Golfo de México.

Escurrimiento acumulado asociado a un Tr de 5 años.

Al igual que los escurrimientos acumulados que se asocian a un tiempo de retorno de dos años, se observa un cauce principal cuyo flujo se dirige hacia el Golfo de México en dirección Suroeste a Nor-Noreste, sin embargo, se observa una diferencia

significativa en el número de ramificaciones, donde es más extenso el cauce principal. (Figura 31)

Escurrimiento acumulado asociado a un Tr de 100 años.

A diferencia de los escurrimientos acumulados antes descritos, en los escurrimientos que se asocian a un tiempo de retorno de cien años, se observa que la acumulación de flujos no tiene un solo cauce principal y estos se distribuyen a lo largo del área de estudio, sin embargo prevalece con mayor magnitud el cauce que ha sido descrito con anterioridad. (Figura 32)

5.5 Generación de mapa de índice de inundación de la RH N°29 (Río Coatzacoalcos).

Mapa de pendientes.

En cuanto a la diferencia de alturas, se presenta un rango que varía desde los cero metros en las regiones más bajas del área de influencia correspondiente a las zonas norte, centro y porciones del sur, hasta los 89.91 metros en la región sur, donde se localiza la zona serrana del estado de Oaxaca y Veracruz. Las pendientes más bajas son identificadas en la Figura 34 con una tonalidad de verde, mientras que las más altas se observan en pequeñas porciones con tonalidades rojizas.

Índice de inundación bruto asociado a un Tr de 2 años.

Las zonas que se observan susceptibles a mayor afectación debido a eventos extraordinarios como lo son las inundaciones dentro de la Región Hidrológica N° 29 en un tiempo de retorno de dos años son el Este y Sur, con un índice cercano a los 28.36 (Figura 35).

Índice de inundación bruto asociado a un Tr de 5 años.

Al igual que los eventos asociados a un tiempo de retorno de dos años, se observa una mayor probabilidad de inundación en las regiones Este y Sur del área de estudio, a diferencia de los eventos antes descritos, las regiones susceptibles a riesgo son

visiblemente mayores, de igual forma se observa probabilidad de inundación al norte de la Región Hidrológica N°29 “Río Coatzacoalcos” (Figura 36).

Índice de inundación bruto asociado a un Tr de 100 años.

Las zonas que presentan mayor vulnerabilidad al ataque de eventos extraordinarios como lo son las inundaciones se presentan al Este y Sur de la Región Hidrológica N° 29, así mismo, se presenta de forma esporádica una posible afectación al norte, suroeste y en los límites de las zonas norte y este (Figura 37).

5.6 Calibración de mapas de índice de inundación.

La calibración de los mapas del Índice de Inundación se realizó con base a los mapas obtenidos mediante el modelo matemático desarrollado en InfoWorks RS (Figura 38 a la Figura 40) así mismo se utilizó los histogramas del índice de inundación para los diferentes períodos de retorno antes mencionados.

Calibración de índice de inundación asociado a un Tr de 2 años.

Como resultado de la calibración se puede observar las zonas este y sur con mayor susceptibilidad a inundación, de forma secundaria se observan susceptibles las zonas norte y centro de la Región Hidrológica N°29 “Río Coatzacoalcos”. La región sur del área de estudio no muestra riesgo de inundación, en donde se localiza la Sierra de Oaxaca y Veracruz (Figura 45).

Calibración de índice de inundación asociado a un Tr de 5 años.

Las zonas que presentan mayor vulnerabilidad y riesgo de inundación ante eventos asociados con un tiempo de retorno de cinco años se alojan de forma predominante al Este, Sureste, Centro y Norte de la Región Hidrológica N°29 “Río Coatzacoalcos”, mientras que la zona fuera de riesgo se ubica al sur del área de estudio (Figura 46).

Calibración de índice de inundación asociado a un Tr de 100 años.

En la Figura 47 se puede observar que toda la región hidrológica del Río Coatzacoalcos se ve vulnerable ante el riesgo de inundación, con mayor persistencia en las zonas noreste y sur.

6. CONCLUSIONES

El presente estudio es una aplicación de la metodología propuesta por Montes, 2012 en la Región Hidrológica N°29 “Coatzacoalcos, la cual tiene como fundamento el análisis del índice topográfico junto con variables utilizadas como lo son factores climatológicos, edafológicos y de uso de suelo, aunado a esto se ha anexado la importancia de los periodos de retorno de 2, 5 y 100 años asociados a eventos meteorológicos como lo fueron Wilma y Stan. Es importante mencionar que el presente estudio se realizó bajo el MDE del SRMT, debido a que el CEM INEGI presentó muchas inconsistencias.

Como seguimiento a este estudio se propone el cálculo de las zonas de erosión hídrica, pues el material producto de esta se deposita finalmente en los cuerpos de agua y zonas de regulación, que con el tiempo van perdiendo su capacidad útil, ocasionado una mayor inundación.

Finalmente, como podemos observar en la comparación de los mapas de división política y municipal de los estados implicados para la Región Hidrológica No. 29 (Figura 48) contra el mapa de zonas inundadas en sobreposición (Figura 49), observamos que las zonas que sufren mayor vulnerabilidad ante el evento de inundación extraordinario ($Tr=100$ años), de acuerdo a la presente metodología son las localidades de Las Chopas, San Lorenzo Tenochtitlán, Agua Dulce, La Venta, Amates, Ignacio López, Poblado 12 y Poblado 15, donde la ciudad de Agua Dulce, Ver. es el municipio que presenta mayor población con 46,010 pobladores, seguido por el municipio de las Choapas, Ver. según el censo realizado por el INEGI en 2010. Por lo que se recomienda que en ambos municipios se desarrollen programas de ordenamiento territorial que avalen los cambios de uso de suelo adecuados y eviten el crecimiento desproporcional de las ciudades generando la propagación de desarrollos informales.

Se recomienda que para futuros desarrollos o reubicación de personas, sea tomado en cuenta el mapa para evitar una catástrofe si se elige un lugar no adecuado.

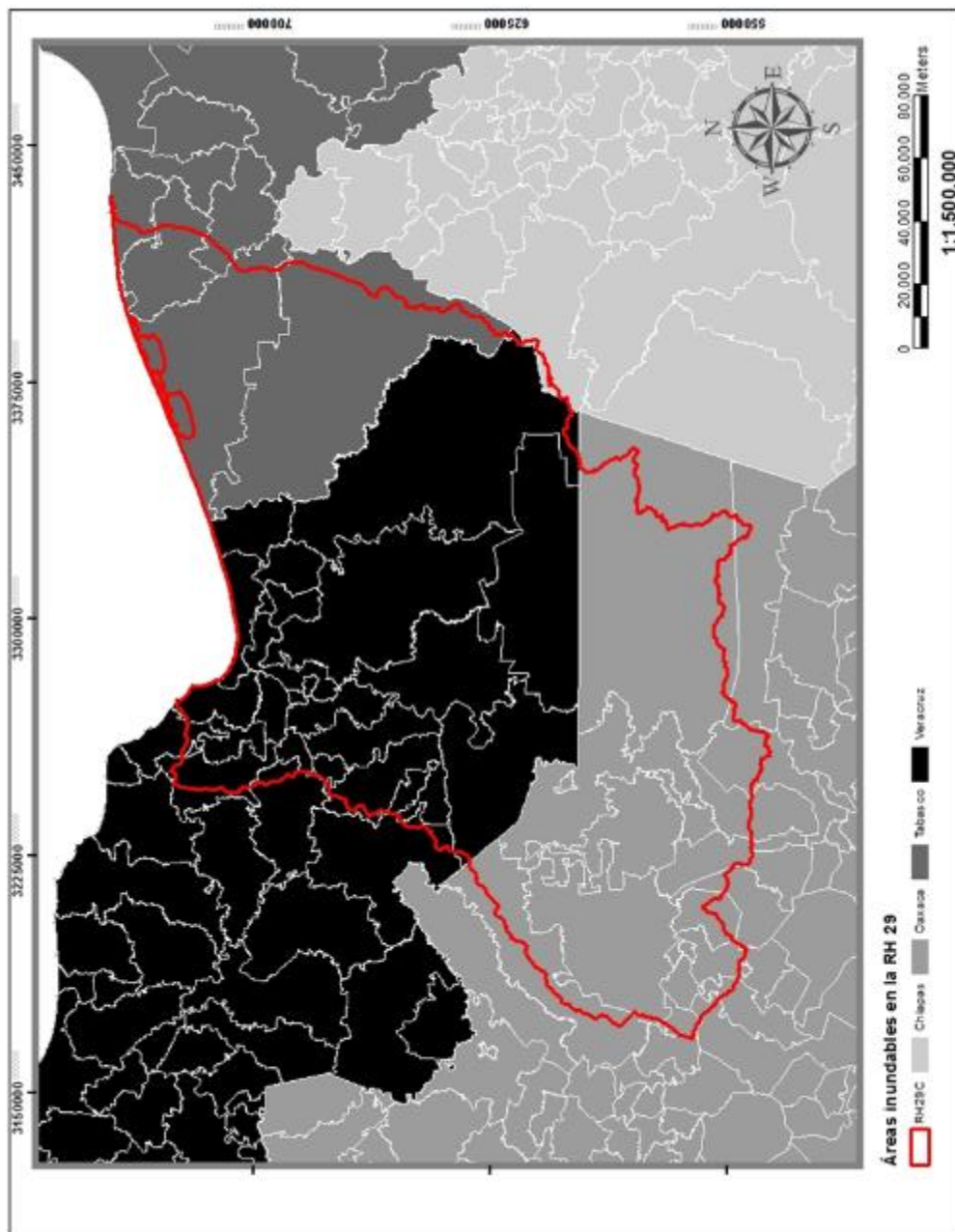


Figura 48 Estados que comprenden la Región Hidrológica No. 29

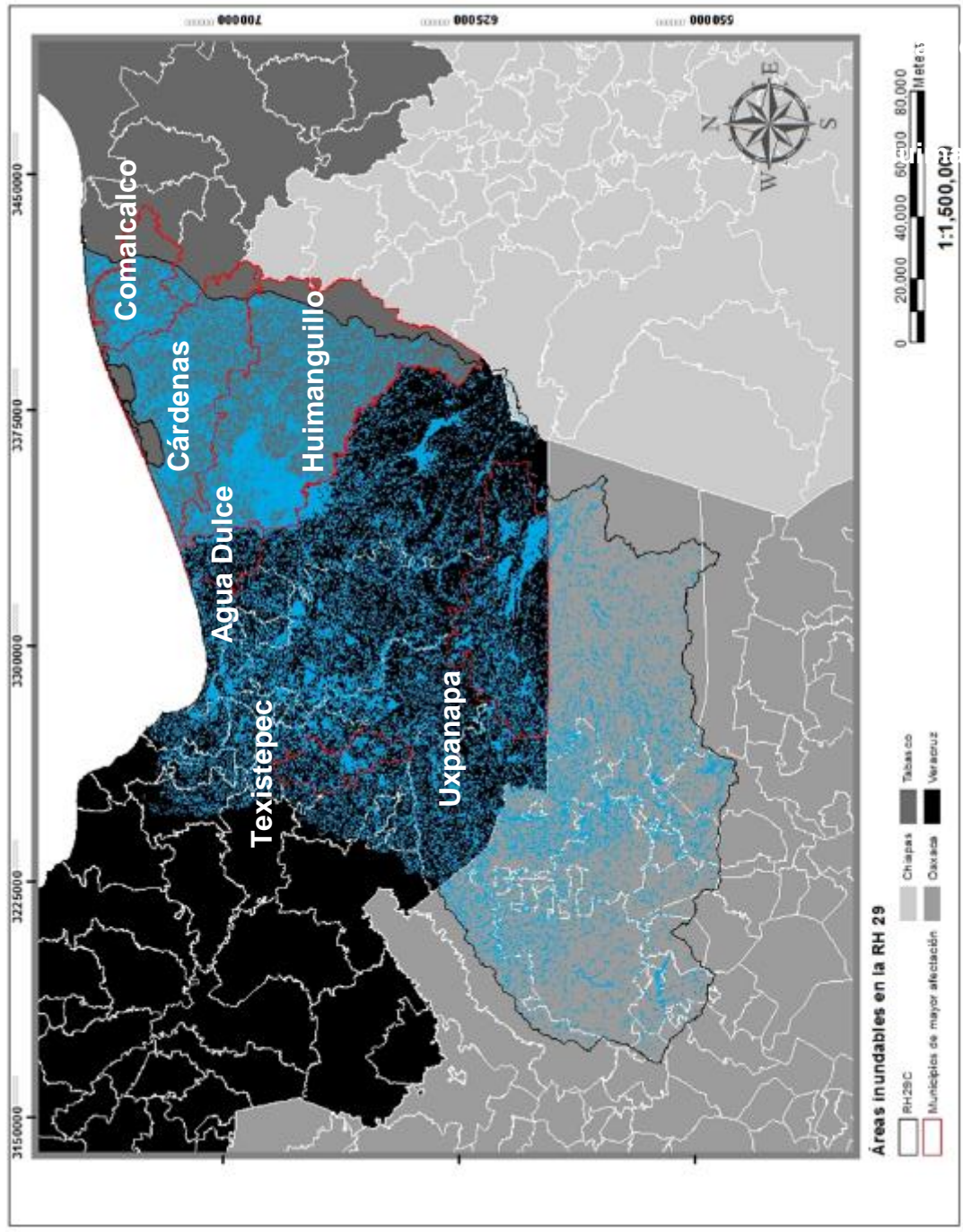


Figura 49 Municipios de mayor afectación por evento extraordinario (Tr=100 años)

El área inundable de la Región Hidrológica No. 29 de acuerdo a los periodos de retorno estimados en este estudio corresponde a lo determinado en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Comparación del área inundable respecto a la Región Hidrológica 29.

Tr = Periodo de retorno (años)	Área inundable (km²)	% de área inundable respecto a la Región Hidrológica 29.
2	7, 061	23.77
5	8, 066	27.15
100	9, 991	33.63

7. REFERENCIAS

Campos D. Procesos del ciclo hidrológico. 3ª Edición. San Luis Potosí: Editorial Universitaria Potosina, **1998**.

CCRC. Consejo de Cuenca del Río Coatzacoalcos. (2013). Disponibilidad de agua en cuenca. Junio, 2013. [En línea]. Disponible <http://www.cuencacoatza.org/tucuenca.php?content=disponibilidad>

CENAPRED. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Atlas climatológico de ciclones tropicales en México. México: CENAPRED, **2002**.

CENAPRED. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Serie de fascículos: Ciclones tropicales. México: CENAPRED, **2013**.

CENAPRED. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Serie de fascículos: Inundaciones. México: CENAPRED, **2004**.

CONAGUA, Bases de datos de isoyetas asociadas a diferentes periodos de retorno.

CRED. Guha D, Hoyois Ph, Below R. Annual disaster statistical review. Brussels: CRED, **2013**.

Gutiérrez, J. S. Saneamiento de la cuenca del río Coatzacoalcos. Consejo de cuenca del río Coatzacoalcos. Junio, 2013. [En línea]. Disponible ftp://ftp.consejosdecuenca.org.mx/pub/downloads/Foro_Nacional_de_Gerencias_Operativas/01-Ponencias/04_Mesa%203-Estrategias%20Implementadas/M03_CCu%20Rio%20Coatzacoalcos_Programa%20de%20Saneamiento.pdf

INEGI, Archivos de uso de suelo y vegetación, Serie IV

INEGI, Archivos de edafología, (Serie II)

INEGI, Continuo de Elevaciones Mexicano. CEM 3.0 (<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/default.aspx>)

IFRC-RCS. International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies. World Disasters Report, 2010. Focus on urban risk. Lyons: International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies, **2010**.

Mata A. Metodología para la identificación, clasificación y cuantificación de los impactos ambientales de los desastres naturales. EUA: CEPAL, **2000**.

Montes, L. M. A. L. “Inundaciones de lo general a lo particular una estrategia para el ordenamiento territorial” Ciencia@uaq, Universidad Autónoma de Querétaro, Vol. 6, No. 1. Enero-Junio **2013**.

Montes, L. M. A. L. “Mapas de riesgo: Inundación y erosión”. Seminarios de Actualización en Ciencias Ambientales. Abril de 2011 [En línea] Disponible: <<http://www.sacauaq.info>> 4 de abril de **2011**.

Ojeda, J. I. (2005). Caracterización del riesgo de inundaciones en las subregiones hidrológicas Norte de Veracruz, Actopan-La Antigua, Jamapa, Papaloapan y Coatzacoalcos. Universidad Autónoma Metropolitana.

Saldívar, A. Olivera, M. Gutiérrez, E. D. Casas, A. (2011). La cuenca baja del río Coatzacoalcos: Evaluando los beneficios económicos y sociales del tratamiento de aguas residuales. INECC.

Sistema Nacional de Protección Civil. Ley General de Protección Civil, publicada en el DOF el 6 de junio de 2012. México: Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2012 [consultado 2014 febrero 23]. Disponible en: <http://www.proteccioncivil.gob.mx>
/work/models/ProteccionCivil/Resource/6/1/images/lgpc.pdf.

Uribe, A.E.M, Montes, L. M. A. L, García, C. E. “Mapa Nacional de Índice de Inundación”. Tecnología y Ciencias del Agua, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Vol. I, No. 2, Abril **2010**, pp. 73-87.

Uribe, J. (2005). Cuenca media y baja del río Coatzacoalcos. ConPro. Junio, 2013. [En línea]. Disponible <http://conpro.tnc.org/1017/>