

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

**“GEOLOCALIZACION DE SITIOS POTENCIALES PARA LA
DISPOSICION FINAL DE RESIDUOS SOLIDOS URBANOS EN LA
SUB-CUENCA NEXAPA, PUEBLA”**

TESIS DE MAESTRÍA

**QUE PARA OBTENER GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA QUÍMICA**

PRESENTA:

“BRAULIO PEREZ POLANCO”

ASESOR:

Dr. EFRAIN RUBIO ROSAS

ASESOR EXTERNO:

M.C. IGNACIO MUÑOZ MÁXIMO

BUAP

H. Puebla Z., Noviembre de 2017



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA
VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA QUÍMICA



ACTA DE REVISIÓN, LIBERACIÓN E IMPRESIÓN DE TESIS

Nombre del (de la) estudiante: BRAULIO PÉREZ POLANCO

Matrícula: 216470570

Nombre del director: DR. EFRAIN RUBIO ROSAS

Nombre del codirector: M.C. IGNACIO MUÑOZ MÁXIMO

Título de la Tesis:

**"GEOLOCALIZACION DE SITIOS POTENCIALES PARA LA DISPOSICION FINAL DE RESIDUOS
SOLIDOS URBANOS EN LA SUB-CUENCA NEXAPA, PUEBLA"**

Comisión Revisora:

Presidente: DR. JOSE ALBERTO GALICIA AGUILAR

Firma:

Secretario(a): DR. HERIBERTO HERNANDEZ COCOLETZI

Firma:

Vocal (1): M.C. IGNACIO MUÑOZ MÁXIMO

Firma:

Vocal (2): DR. EFRAIN RUBIO ROSAS

Firma:

Los integrantes de la Comisión Revisora expresamos que hemos leído y revisado el manuscrito de la tesis de maestría que presenta el (la) estudiante arriba indicado, por lo que **estamos de acuerdo en que se proceda con la impresión definitiva de la tesis y que el (la) estudiante presente su defensa y examen de grado en la fecha, horario y lugar que se indican a continuación.**

Fecha de examen: 07 de diciembre del 2017

Hora: 12:00 hrs

Día de la semana: Jueves

Lugar: FIQ 8 SALA AUDIOVISUAL 202



Revisa y Autoriza: Sello de la Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado. - FIQ. - BUAP



BUAP

Oficio: FIQ/SIEP/122/2017

Mtro. Omar Aguirre Ibarra
Director de Administración Escolar
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
PRESENTE

Reciba un afectuoso saludo y al mismo tiempo me permito presentar a usted a los integrantes del jurado de examen que para obtener el grado de Maestro en Ingeniería Química sustentará el

Ing. Braulio Pérez Polanco

perteneciente a la generación 2016 con número de matrícula 216470570 y cuyo tema de tesis es: "Geolocalización de sitios potenciales para la disposición final de residuos sólidos urbanos en la Sub-Cuenca Nexapa, Puebla". Dicho jurado está integrado por:

JURADO

Presidente: Dr. José Alberto Galicia Aguilar
Secretario: Dr. Heriberto Hernández Cocoltzi
Vocal: M.C. Ignacio Muñoz Máximo
Vocal: Dr. Efraín Rubio Rosas

Asimismo, comunico a usted que el alumno cumple con todos los requisitos para poder llevar a cabo su examen de grado y que los integrantes de este jurado están citados con anticipación para la fecha y lugar indicados a continuación.

FECHA DE EXAMEN: 07 de diciembre de 2017
HORA: 12:00 horas
LUGAR: Facultad de Ingeniería Química, FIQ8 Sala Audiovisual 202
DÍA: Jueves

Sin otro particular, me es grato quedar de usted.

Atentamente
"Pensar bien, para vivir mejor"
H. Puebla de Z. a 29 de noviembre de 2017


Dr. Irving Israel Ruiz López
Secretario de Investigación y Estudios de Posgrado



80  **AÑOS**
DE UNIVERSIDAD

c.c.p. Archivo
E-mail: irving.ruiz@correo.buap.mx

Facultad de Ingeniería Química | Av. San Claudio s/n, Col. San Manuel, Ciudad Universitaria, Puebla, Pue. C.P. 72570
01 (222) 229 55 00
Ext. 7250 y 7251

Agradecimientos

Quiero agradecer primero a Dios y a la virgen de Guadalupe, por haberme permitido estar en este mundo, por acompañarme y guiarme a lo largo de mi vida, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad, por haberme dado la hermosa familia que tengo, y por brindarme una vida llena de experiencias, aprendizajes, alegrías, tristezas, etc.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por haberme brindado la oportunidad de participar en el proyecto CONACYT-SEMARNAT No. 263253 con el título “Estudio integral de ubicación óptima de sitios de disposición futura de rellenos sanitarios a nivel regional, considerando aspectos físicos, ecológicos y socioeconómicos” a través del Centro Universitario de Vinculación (CUV-BUAP) y proporcionarme los apoyos necesarios para la culminación satisfactoria de esta investigación.

A la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla por darme la oportunidad de realizar mis estudios de licenciatura y maestría. En especial a la facultad de Ingeniería Química quien abre sus puertas brindándonos la oportunidad de una formación profesional, ética y moral con bases firmes.

Antes que nada quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi director de tesis, Dr. Efraín Rubio Rosas, por darme la oportunidad de trabajar con él, por haber tenido la paciencia necesaria para ayudarme, por transmitirme su conocimiento y por ser demasiado accesible en todo momento.

Al M.C. Ignacio Muñoz Máximo, mi asesor externo, por compartirme sus conocimientos, otorgarme la ayuda, tiempo, dedicación y orientación suficientes para poder efectuar este trabajo. También le agradezco por los consejos y por extenderme la mano para la culminación de mi tesis.

"Dedicatoria"

Para mis papas, Ma. Antonia y Manuel por su apoyo, consejos, comprensión, amor, ayuda en los momentos de mi vida, por su sacrificio y por ayudarme con los recursos necesarios. Me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi carácter, mi empeño, mi perseverancia, mi coraje para conseguir mis objetivos. Por haberme apoyado a lo largo de mi trayectoria profesional, por los valores que me han inculcado desde pequeño, por todos los consejos que me dieron con cariño, por la paciencia que me tuvieron y porque siempre creyeron en mí y en que esto sería posible, por todo su esfuerzo para que yo ahora este culminando esta etapa de mi vida darles las gracias por apoyarme en todos los momentos difíciles de mi vida y siempre han estado junto a mí.

A Massiel por todo el apoyo brindado, por aguantarme y por siempre buscar la manera de tenerme de buenas. Por soportar mis ratos de histeria. Por ser una excelente esposa.

Para Braulio Yahel e Iker Manuel Si no estuvieran, mi vida sería un desastre. Cada vez que los veo, me doy cuenta que estoy frente a los retratos vivos de su madre y yo, y al mismo tiempo siento mayor fortaleza para trabajar fuertemente y seguir con el objetivo de alcanzar mis metas. Ustedes son mi principal motivación.

Muchas gracias hijos, para que sirva de ejemplo que se pueden alcanzar las metas que tengamos.

“Nadie está a salvo de las derrotas. Pero es mejor perder algunos combates en la lucha por nuestros sueños, que ser derrotado sin saber siquiera por qué se está luchando.”

Paulo Coelho.

Geolocalización de sitios potenciales para la disposición final de residuos sólidos urbanos en la cuenca Nexapa, Puebla

RESUMEN

En la presente investigación se desarrolló e integró una metodología encaminada a la localización de sitios potenciales ambientalmente seguros para la disposición final de Residuos Sólidos Urbanos (RSU). Las variables consideradas se dividen en factores y restricciones de las distintas temáticas, que están implícitas en la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003. La metodología aplicada incluye el uso de Sistemas de Información Geográfica, el análisis Multivariante por conglomerados (isocluster) y el método Multicriterio. A partir de la metodología señalada, se determinó la localización óptima para un Relleno Sanitario en la región de la sub-cuenca de Nexapa, que incluye como principales municipios a: Atlixco, Tochinilco, Atztlizhuacan, Huaquechula, Tianguismanalco. La integración de las distintas temáticas evaluadas (*e. g.*, uso de suelo, ríos, poblaciones, etc.) se realizó a partir de la construcción de una matriz de pesos ponderados (Pp), que fueron evaluadas en el software ArcGIS 10.1 con la herramienta álgebra de mapas. El resultado fue la obtención de un mapa con rangos que señalan los sitios más (o menos) aptos en la región para la futura planeación de la confinación de Residuos Sólidos Urbanos. Sin embargo, fue necesario depurar el primer mapa a partir del uso de una imagen LANDSAT 8 y Google Earth, para obtener finalmente el mapa de aptitud de Sitios Potenciales para Residuos Sólidos Urbanos (SP-RSU). Los sitios obtenidos en el mapa de aptitud como viables, fueron verificados mediante una campaña de campo en la región. En campo se confirmó que los resultados obtenidos son fehacientes en un 98 %, incluso en el actual Relleno Sanitario de Atlixco denominado RESIRA, coincide dentro de los sitios propuestos como viables en la región.

Índice

	Pág.
1. Introducción.....	1
1.1 Justificación.....	4
1.2 Objetivos.....	5
1.2.1 Objetivo General.....	5
1.2.3 Objetivos Específicos.....	5
1.3 Hipótesis General.....	5
2. Marco Teórico.....	6
2.1 Localización del Área de Estudio.....	6
2.2 Antecedentes de la situación de los residuos sólidos en México.....	7
2.3 El relleno sanitario intermunicipal de Atlixco (RESIRA).....	9
2.4 Relleno sanitario.....	11
2.5 Rellenos Sólidos Urbanos (RSU).....	14
2.6 Marco Normativo Legal de México.....	14
2.7 Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en la identificación de sitios potenciales para ubicación de rellenos sanitarios.....	15
3. Metodología.....	17
3.1 Recopilación de la información.....	18
3.2 Delimitación del área de estudio.....	18
3.3 Integración de criterios normativos.....	18
3.4 Método Multicriterio.....	22
4. Resultados.....	23
4.1 Mapas de Factores y Restricciones.....	29
4.2.- Obtención del mapa de aptitud de SP_RSU.....	50
5. Conclusiones y recomendaciones.....	54
5.1Conclusiones.....	54
5.2 Recomendaciones.....	56

6. Bibliografía.....	58
7. Anexos.....	65
Anexo 1. Generación de capas temáticas con ArcGIS 10.1.....	65
Anexo 2. Generación de capas temáticas de restricción con ArcGIS 10.1.....	67
Anexo 3. Fotos de las verificaciones de campo.....	68

Índice de figuras

Figura 1 Localización del área de estudio (elaboración propia, a partir de datos, capas temáticas y modelo digital de elevaciones de SEMARNAT e INEGI, 2015).....	7
Figura 2. Esquema metodológico para la geolocalización de sitios potenciales para la deposición final de residuos sólidos urbanos.....	17
Figura 3. Restricciones y factores considerados para la geolocalización de sitios potenciales para el establecimiento de RSU, extraídos de la NOM-083-SEMARNAT-2003.....	20
Figura 4. Mapa de uso de suelos, en él se han simplificado las clases agrícola y tipo de bosque (elaboración propia a partir de información de INEGI, 2016).....	29
Figura 5. Mapa de principales poblaciones urbanas (elaboración propia a partir de información de INEGI, 2016).....	30
Figura 6. Mapa zonal de restricción de 1000 m a las poblaciones urbana (elaboración propia a partir de información de INEGI, 2016).....	31
Figura 7. Mapa de distancias a las poblaciones urbanas (elaboración propia a partir de información de INEGI, 2016).....	32
Figura 8. Mapa de pendientes a partir del Modelo Digital de Elevaciones SRTM (elaboración propia a partir de información de INEGI, 2016).....	33
Figura 9. Mapa hidrológico de la sub-cuenca de Nexapa (elaboración propia a partir de información de INEGI, 2016).....	34
Figura 10. Mapa zonal de restricción a 500 m de los principales ríos y cuerpos de agua de la sub-cuenca Nexapa (elaboración propia a partir de información de INEGI, 2016).....	35
Figura 11. Mapa de pozos de la sub-cuenca Nexapa (elaboración propia a partir de información de CONAGUA, 2016).....	36
Figura 12. Mapa zonal de restricción en pozos de la sub-cuenca Nexapa (elaboración propia a partir de información de CONAGUA, 2016).....	37
Figura 13. Mapa de inundaciones de la sub-cuenca Nexapa (elaboración propia a partir de información de CONABIO, 2016).....	38
Figura 14. Mapa de unidades hidrogeológicas la sub-cuenca Nexapa (elaboración propia a partir de información de INEGI, 2016).....	39
Figura 15. Mapa de fallas y fracturas geológicas de la sub-cuenca Nexapa (elaboración propia a partir de información de INEGI, 2016).....	40

Figura 16. Mapa de distancias a las principales zonas urbanas en la sub-cuenca Nexapa (elaboración propia a partir de información de INEGI, 2016).....	41
Figura 17. Mapa de distancias a las principales caminos en la sub-cuenca Nexapa (elaboración propia a partir de información de INEGI, 2016).....	42
Figura 18. Mapa de distancias a las principales carreteras en la sub-cuenca Nexapa (elaboración propia a partir de información de INEGI, 2016).....	43
Figura 19. Mapa de distancias a pozos en la sub-cuenca Nexapa (elaboración propia a partir de información de CONAGUA, 2016).....	44
Figura 20. Mapa de distancias a ríos en la sub-cuenca Nexapa (elaboración propia a partir de información de CONABIO, 2016).....	45
Figura 21. Mapa de distancias a principales cuerpos de agua en la sub-cuenca Nexapa (elaboración propia a partir de información de CONABIO e INEGi, 2016).....	46
Figura 22. Mapa de distancias a principales zonas de inundación en la sub-cuenca Nexapa (elaboración propia a partir de información de CONABIO e INEGi, 2016).....	47
Figura 23. Mapa de distancias a fallas y fracturas en la sub-cuenca Nexapa (elaboración propia a partir de información de INEGI, 2016).....	48
Figura 24. Mapa de evaluación por pesos ponderados para la detección de sitios potenciales para Residuos Sólidos Urbanos en la sub-cuenca Nexapa (elaboración propia a partir de información de INEGI, 2016).....	49
Figura 25. Mapa de aptitud obtenido, de sitios potenciales para residuos sólidos urbanos (SP-RSU), superpuesto a imagen Landsat 8 (imagen de marzo de 2017).	52
Figura 26. Mapa de aptitud obtenido, de sitios potenciales para residuos sólidos urbanos (SP-RSU), En formato KMZ. Las pijas en amarillo, representan los sitios verificados en campo.....	53

Índice de tablas

Tabla 1. Matriz de ponderación de variables de terreno para ubicar un RSU.....	21
Tabla 2. Variables ponderadas por peso, para las distintas capas temáticas.....	23

1. Introducción

La disposición final de los residuos sólidos urbanos (RSU) en México es uno de los retos antropogénicos más importantes, a los que nos enfrentamos. La generación total de RSU en el país difiere de manera importante a nivel geográfico y varía substancialmente entre los grandes núcleos urbanos y las zonas rurales (INEGI, 2013). La generación de RSU a tenido una tendencia de incremento notable en la última década, entre 2003 y 2011 creció ~25 % como resultado del crecimiento urbano, el desarrollo industrial y el crecimiento económico, generándose alrededor de 41 millones de toneladas en 2011, equivalente a 112.5 mil toneladas de RSU diarios (SEDESOL, 2013). En 2011, la generación de residuos en localidades rurales (o semiurbanas) que son aquellas con una población < 15 mil habitantes y que albergan en conjunto 38% de la población del país, representó únicamente el 11% del volumen total nacional. En contraste, las zonas metropolitanas (con más de un millón de habitantes) que albergaban el 13% de la población nacional) contribuyeron con el 43% de los residuos totales (SEDESOL, 2013). El manejo de la basura representa un serio problema para México en sus estados y municipios, estos últimos son los encargados de recolectar, transportar y dar disposición final a los RSU en tiraderos a cielo abierto o en un relleno sanitario.

La Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT que entró en vigor el 19 de diciembre de 2004, ha sido y es usada como el criterio principal para identificar los sitios designados para establecer un relleno sanitarios. La norma define a un relleno sanitario como una obra de infraestructura que aplica métodos de ingeniería para la disposición final de los RSU (residuos sólidos urbanos) sobre el suelo, esparciéndolos y compactándolos al menor volumen posible, para cubrirlos con material natural y/o sintético. Desde su publicación las dependencias gubernamentales responsables del medio ambiente (*e. g.*, SEMARNAT) se han dado a la tarea de buscar establecer estos rellenos sanitarios de forma sistemática, apegados a los criterios de esta norma buscando evitar cualquier afectación ambiental. Sin embargo aún no existe un control adecuado ya que actualmente aún existen un gran número de sitios no controlados, violando los lineamientos estipulados en la NOM-083-SEMARNAT (Galindo, 2009). Estos sitios por lo general son elegidos al azar (principalmente en las zonas rurales) generando incorporación de lixiviados al subsuelo y

emisión de gases tóxicos, debido a quemas no controladas produciendo diversos impactos ambientales, que se traducen en efectos adversos a la salud y el ambiente.

De acuerdo con el INEGI (2015), la disposición final de RSU en rellenos sanitarios en 2012 fue de 1,609.45 mil toneladas, distribuidas en 256.41 sitios controlados y 28.49 en sitios no controlados. De acuerdo con INEGI (2013), para el estado de Puebla en 2012 solo se tienen 18 rellenos sanitarios oficialmente establecidos. Se estima que el total de RSU para el estado de Puebla en 2012 fue de 1,894.35 toneladas de las cuales se recolectaron 1,784.12 toneladas. En Puebla, en el año 2010, de los 217 municipios oficialmente 202 contaban con servicio de recolección y disposición final, solo 10 contaban con servicio de recolección, disposición final y tratamiento, y 5 se encuentran sin servicios (INEGI, 2015). La cifra de los sitios no controlados, no es oficial y varía según el año del censo, formato de la encuesta y forma de la colección de los datos (INEGI, 2017). Los sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos (SDF-RSU) controlados y no controlados benefician a una población de 5, 599,048 de un total de 6, 002,161 habitantes, equivalente a un 93.28 % del total (CONAPO, 2013; SEDESOL, 2013; INEGI, 2015). No obstante, los impactos económicos, ambientales, y a la salud humana, son diversos y carentes de información.

Para atender estas problemáticas, respecto a la disposición final de residuos sólidos urbanos (RSU), el gobierno del estado de Puebla ha buscado estratégicamente establecer rellenos sanitarios intermunicipales, que sean ambientalmente amigables. En la denominada región de Atlixco, en el año 2001 se estableció el relleno sanitario intermunicipal de Atlixco (RESIRA), que inicialmente pretendía dar servicio a los municipios de Atlixco, Atzitzihuacan, Huaquechula, Tianguismanalco y Tochimilco. Sin embargo paulatinamente fueron proporcionando el servicio a más usuarios, llegando a un total de 11 municipios para el año 2013. En un inicio RESIRA, había sido planificado para cerrar operaciones en el año 2014, sin embargo su vida se ha extendido hasta el día de hoy (mayo de 2017) excediendo día con día su capacidad.

Mediante el uso combinado de Sistemas de Información Geográfica y la técnica de evaluación multicriterio (Barredo, 1999; Teodoro-Silva *et al.*, 2006; Mena-Frau *et al.*,

2010; González y Minga, 2010; Paz., 2011; Flores, 2013), considerando la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT, en esta investigación, se han identificado de forma sistemática los sitios potenciales para planificar la construcción de un nuevo relleno sanitario, que satisfaga las actuales y futuras demandas de los usuarios de RESIRA, relleno sanitario que atiende las necesidades de los municipios de la sub-cuenca de Nexapa, Puebla.

1.1 Justificación

La disposición final de los residuos sólidos urbanos, es una responsabilidad que le compete a todos los estados y sus municipios. El artículo 115 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, faculta a los municipios el servicio público de limpia, la recolección, traslado, tratamiento, y disposición final de los residuos sólidos urbanos. Identificar sitios propicios para establecer un relleno sanitario es un grave problema, debido a la continua expansión de los núcleos urbanos, ocasionando diversos problemas de salud, medioambientales y sociales. En el estado de Puebla con el fin de atender esta problemática, en 1998 se creó un programa especial para la construcción y operación de sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos bajo el esquema de cobertura regional. En el año 2001, los municipios de Atlixco, Huaquechula y Tochimilco, Tianguismanalco, y Atzitzihuacan establecieron un relleno sanitario intermunicipal, que inició operaciones el 15 de julio de ese año. Para el año 2013 este relleno sanitario conocido como RESIRA, ya había alcanzado una capacidad de almacenamiento de 450,000 toneladas, equivalente al 45 % de su capacidad, por lo cual su vida útil debió haber finalizado en el año 2014. El sitio de ubicación RESIRA fue construido bajo la antigua norma derogada NOM-083-ECOL-1996, por lo tanto el diseño se valió entonces del proyecto de NOM-084, así como recomendaciones nacionales e internacionales para la operación de sitios de disposición final. Durante los últimos 15 años los usuarios se han incrementado, incorporándose los municipios Santa Isabel Cholula y San Diego de la Mesa Tochimiltzingo, e incluso la atención de algunas empresas (*e. g.*, PASA, GREEN CARSON). Lo anterior, ligado al incremento de la población y expansión de la mancha urbana, hacen imposible que RESIRA siga soportando la demanda actual, por lo tanto es crucial identificar de forma sistemática sitios potenciales a escala regional para la futura disposición de residuos sólidos urbanos (RSU), que satisfaga las necesidades presentes y futuras (a mediano y largo plazo) evitando así problemas de contaminación (en ríos, aguas subterráneas, áreas naturales, barrancas etc.) tiraderos de basura clandestinos (sitios no controlados) y problemas sociales. También serviría como un criterio e indicador territorial a considerar para la adecuada planificación de la expansión urbana e industrial de la región, el cambio del uso del suelo, que garantice a las generaciones presentes y futuras un mejor medio ambiente y el manejo sustentable de los RSU.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Ubicar espacialmente sitios potenciales para la disposición de residuos sólidos urbanos mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica, aplicando la técnica de evaluación multicriterio en la sub-cuenca de Nexapa, estado de Puebla.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Recopilar, analizar y sintetizar la información temática disponible sobre el área de estudio, para implementar los criterios normativos nacionales de la NOM-083-SEMARNAT- 2003.
- Obtener un mapa de aptitud de sitios potenciales para la disposición de residuos sólidos urbanos.

1.3 Hipótesis General

A partir del uso de sistemas de información geográfica y la técnica de análisis multicriterio, permite en forma sistemática y económica la evaluación territorial para geolocalizar sitios potenciales para la disposición de rellenos sólidos urbanos en la sub-cuenca de Nexapa, Puebla, garantizando que los sitios identificados sean viables en la realidad.

2. Marco Teórico

2.1 Localización del Área de Estudio

El área de estudio se encuentra en la sub-cuenca Nexapa (parte alta de la cuenca del balsas, CONAGUA, 2010), entre las coordenadas 98°50'16.247"W, 19°47'9.65"N y 98°16'1.201"W, 18°39'3.335"N. El área de estudio es integrada por los municipios de: Santa Cruz Tehuixpango, Tezonteopan de Bonilla, Atlixco, San Jerónimo Coyula, San Juan Amecac, San Pedro Benito Juárez, San Juan Tejupa, Atzitzihuacan, Tochmilco, Huaquechula, Cacaloxúchitl, San Antonio Alpanocan, La Magdalena Yancuitlalpan y Tianguismanalco, estado de Puebla (Figura 1). Desde la ciudad de Puebla, capital del estado de Puebla, puede accederse por la vía Atlixcayotl. La región tiene como principal actividad la agricultura, debido al excelente clima y los magníficos terrenos del valle, que son irrigados por las numerosas vertientes de agua del volcán Popocatepetl y numerosos influentes del río Atoyac.

Los principales cultivos son maíz, frijol, distintas hortalizas (*e. g.*, lechuga, espinaca, acelgas), el cultivo de flores y plantas ornamentales. Particularmente la floricultura, el turismo y la piscicultura se han convertido en una actividad económica de grandes perspectivas para el desarrollo municipal en la región. Morfológicamente, la región se encuentra comprendida dentro de dos unidades divididas por la cota 2,000 m, hacia el Noroeste se encuentra el valle de Puebla, y hacia el este el valle de Atlixco, ambas topografías son controladas principalmente por los descensos meridionales de las faldas de la Sierra Nevada, principalmente de los estratovolcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl. A escala regional el clima es cálido y subhúmedo con una temperatura media anual de 16° aproximadamente.

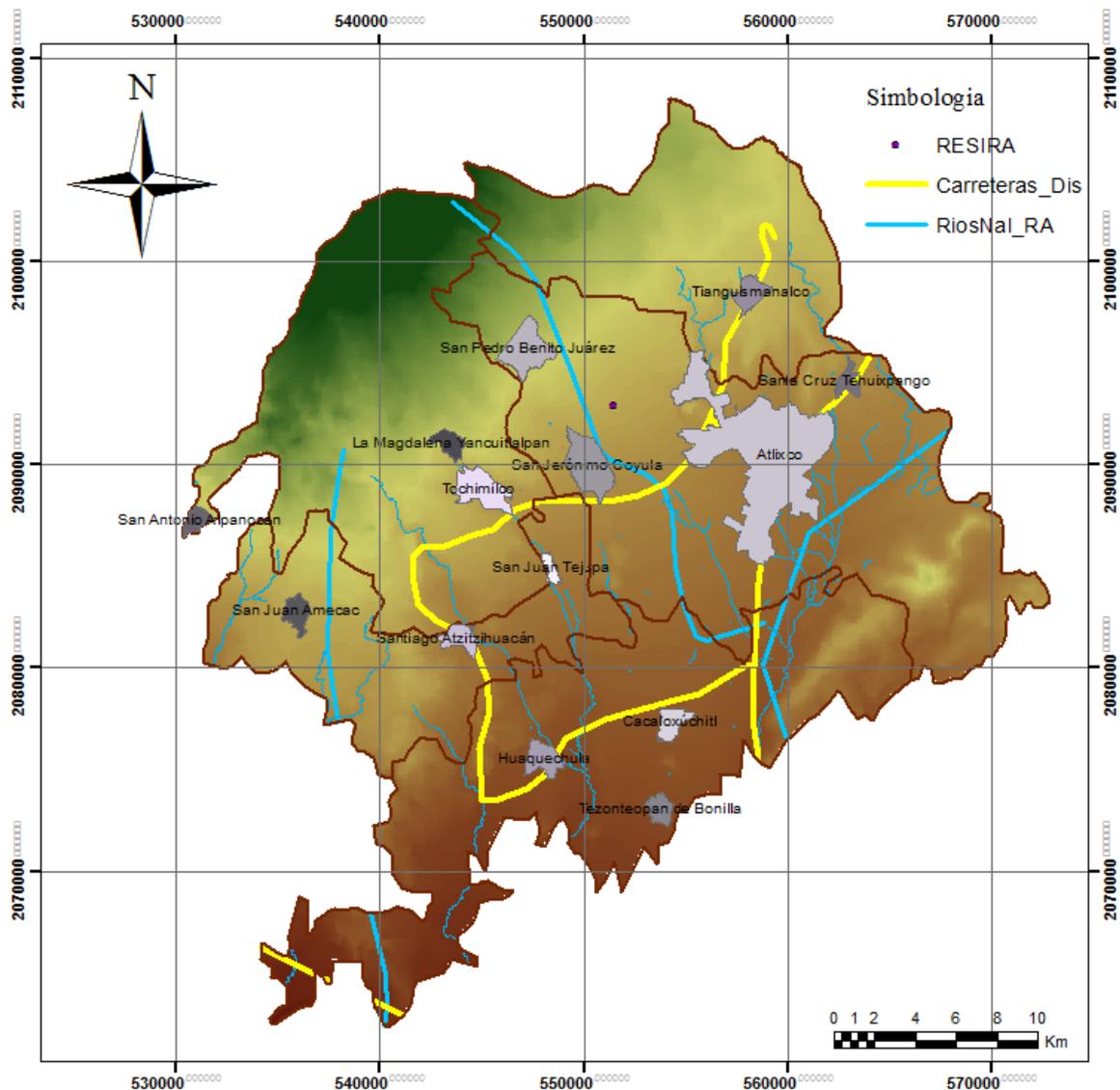


Figura 1. Localización del área de estudio (elaboración propia, a partir de datos, capas temáticas y modelo digital de elevaciones de SEMARNAT e INEGI, 2015).

2.2 Antecedentes de la situación de los residuos sólidos en México

El control de los residuos sólidos municipales (RSM) generados por los habitantes del país, se inició en la época precortesiana, mientras que la salud pública en México quedó legalmente sustentada el día 15 de Julio de 1891, fecha en la que se expidió el Primer Código Sanitario elaborado por el Consejo Superior de Salubridad (INE, 2013). A su vez, los primeros estudios relacionados con los RSM se realizaron hasta la segunda

década del presente siglo, cuando la Comisión Constructora estuvo a cargo del Ing. Miguel Ángel de Quevedo, quién desarrolló estudios de pulverización de residuos sólidos para destinarlos a abono agrícola y estudios de saneamiento en varios barrios de la Ciudad de México. Los primeros intentos por parte de la federación en el control de los RSM, se inician apenas en el año de 1964 (INE, 2013), cuando la Dirección de Ingeniería Sanitaria pasó a formar parte de la Comisión Constructora e Ingeniería Sanitaria de la Secretaría de Salubridad y Asistencia (CCISSA), con la finalidad de atender a nivel nacional los programas de recolección y disposición de RSM. Con este organismo da principio la incorporación de técnicas y métodos de ingeniería para tratar de solucionar el problema cada vez más creciente de los residuos sólidos urbanos (RSU). La primera obra de gran magnitud para el control de los RSU se realiza en la década de 1960, cuando en la Ciudad de Aguascalientes se diseña y opera el primer relleno sanitario del país, bajo la dirección de profesionales y técnicos de la CCISSA (SEMARNAT, 2007).

Al relleno sanitario de la Ciudad de Aguascalientes, le siguieron planes integrales de recolección y disposición de los RSU en las principales capitales de los estados de la república y en otras ciudades, que por su importancia, contaban con la asesoría necesaria para resolver este problema. Este tipo de asesorías por parte del gobierno federal terminaron en el año de 1981, cuando CCISSA se liquidó y las funciones de la parte de Ingeniería Sanitaria fueron absorbidas por la Subsecretaría de Mejoramiento del Ambiente (SMA) de la misma Secretaría de Salubridad y Asistencia, creada en 1972 (INE, 2013). En el Consejo Técnico de la SMA, se inició un programa a nivel nacional que duró tres años (1973-1976) con el apoyo de un crédito otorgado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). Por medio del PNUMA se proporcionó asesoría y se desarrollaron los proyectos ejecutivos de manejo y disposición final de los RSU en las ciudades de Acapulco, Tijuana, Mexicali, Saltillo, Cd. Juárez, Tuxtla Gutiérrez, Monterrey y Ensenada. También se iniciaron los primeros cursos de capacitación para personal de los municipios, y se desarrollaron las primeras instancias para identificar el problema de los residuos sólidos industriales. A fines de la década de 1970 y hasta 1982, en la Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas (SAHOP), dentro de la Subsecretaría de Asentamientos Humanos y en la Dirección de Ecología Urbana (DEU), se llevaron a cabo

una serie de proyectos, así como la elaboración de normas técnicas para el control de los RSU (INE, 2013).

Con la creación de la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE) en el año 1982, todas las atribuciones en el área de control de RSU se conjuntaron en la Subsecretaría de Ecología. En esta dependencia, a partir de 1983, se inicia el programa RS100, el cual consistió en la elaboración de proyectos ejecutivos de relleno sanitario en las ciudades mayores de 100,000 habitantes (INE, 2013). Aunado a lo anterior, se elaboraron los manuales de diseño de rellenos sanitarios y los primeros programas de diseño de rutas de recolección mediante el uso de computadora, así como los proyectos ejecutivos para el confinamiento de residuos industriales. Se continuó impartiendo cursos de capacitación y adiestramiento a personal de los municipios del país (INE, 2013).

En 1992 desaparece la SEDUE y se crea la Secretaría de Desarrollo Social, (SEDESOL) la cual incluye en su estructura al Instituto Nacional de Ecología (INE). La SEDESOL continúa brindando apoyo a los municipios a través del desarrollo de proyectos ejecutivos y del financiamiento para la construcción de infraestructura para el control de los RSU y su operación hasta hoy. La Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP) se crea en 1994 incorporando al INE y a los demás órganos que en SEDESOL se ocupaban de cuestiones ambientales. En este contexto el INE, asume la responsabilidad del desarrollo de la normatividad de los residuos sólidos municipales y en el año de 1996 promulga la norma oficial mexicana (NOM-083-ECOL-1996) que establece los requerimientos para la selección y ubicación de sitios para establecer rellenos sanitarios (INE, 2013).

2.3 El relleno sanitario intermunicipal de Atlixco (RESIRA)

El relleno sanitario intermunicipal de Atlixco (RESIRA) se encuentra ubicado a 5.5 Km de la carretera San Pedro Benito Juárez, Atlixco Puebla, en terrenos donados por tres municipios, en las coordenadas 551459 E - 209292 N, en una planicie atravesada por cañadas con dirección NW–SE, direccionando la circulación de los flujos de agua superficial a favor del gradiente natural, proveniente de los depósitos de pie de monte y fracturas asociados con el edificio volcánico del estratovolcán Popocatepetl. A escala

regional, la orografía tiene su menor altura al sur con 1,700 m, ascendiendo suavemente hasta alcanzar en el extremo Noroeste los 2,500 m hacia las estribaciones del Volcán Iztaccíhuatl.

La porción central básicamente es un extenso valle, aunque al Sureste aparecen formaciones montañosas aisladas que culminan en los cerros de Zoapiltepec y Texistle, y en el norte con los cerros el Pochote, Tecuitlacuelo, loma La Calera y el Charro. Esta región pertenece en su totalidad a la subcuenca del río Nexapa (afluente del Atoyac). La región es irrigada por numerosas corrientes que provienen de barrancas de la estribación Noroeste del volcán Iztaccíhuatl (aunque la gran mayoría son intermitentes), siendo la principal el río Nexapa (de carácter permanente) que cruza por la mitad del valle de Atlixco. Las corrientes más importantes son: el río Molino, el Cuescomate y el río Palomas. En la región existe un sistema de canales de riego distribuidos por todo el territorio, utilizados primordialmente para la agricultura. De acuerdo al censo 2010 (COESPO, 2011) la precipitación que se presenta en verano (junio - octubre) en la zona del relleno sanitario es de ~1000 mm. El promedio de precipitación anual es de 900 – 1300 milímetros El tipo de clima dominante es semicálido subhúmedo (AC w1) con lluvias en verano de humedad media y temperatura media anual de ~17.9 ° C (COESPO, 2011)

Originalmente, el RESIRA fue diseñado con el propósito de albergar la disposición final de los residuos sólidos urbanos provenientes de los municipios de Atlixco, Atzitzihuacan, Huaquechula Tianguismanalco y Tochimilco. Debido al carácter intermunicipal del proyecto, actualmente el RESIRA se ha visto superado de sus planes originales ya que su periodo de vida se ha extendido ya dos años. Actualmente RESIRA también proporciona servicio a los municipios de Santa Isabel Cholula, Cohuecan, Atzompan, Cuautlancingo, Tepeojuma, Tecuanipan, Santa Clara y Ocoyucan. Esto se traduce obviamente en el incremento de la generación de residuos sólidos urbanos y por consecuencia la disminución de su vida útil, haciendo imprescindible la construcción de una nueva celda de forma inmediata en este año 2016.

El municipio de la región con mayor población es Atlixco con 127,062 habitantes (INEGI, 2010), población equivalente al 73.06% que tira sus residuos sólidos urbanos

(RSU) en el RESIRA, razón por la cual el director actual del relleno (Juventino Hernández Lima) ha mencionado públicamente por distintos medios (*e. g.*, televisión, radio, internet) que de llegar a la máxima capacidad la celda tendrá que darle prioridad al municipio de Atlixco y no a otros municipios de los 10 que actualmente son atendidos. Ello hace urgente la localización de sitios potenciales para la ubicación y planeación de nuevos rellenos sanitarios en la región, ya que de no tomarse las medidas pertinentes esta situación podría culminar en problemas de carácter social severos y de afectación ambiental grave.

De acuerdo con Tobón (2013) RESIRA es un relleno sanitario trabajado en óptimas condiciones (certificado en la norma ISO 14000), en el se han realizado 6 pozos de recuperación de biogás dentro de las 3.5 Ha que conforman el relleno. Este biogás producido, resulta ser un problema serio para los rellenos sanitarios debido a que si no se controla, evacua o detecta su acumulación este biogás se puede disipar sin control dentro del terreno e invadir incluso zonas adyacentes, pudiendo producir explosiones e incendios severos cuando su manejo es inadecuado, debido a que este biogás es explosivo e inflamable. Tobon (2013) estimo que RESIRA genera 353,232.0 m³/año de biogás, acumulando en 12 años de operación (hasta 2013) aproximadamente 3, 649,559.5 m³/año.

2.4 Relleno sanitario

De acuerdo con Jaramillo (1991) un relleno sanitario, es la técnica de eliminación final de los desechos sólidos en el suelo, que no debe causar molestias ni peligro para la salud y seguridad pública. Tampoco perjudica el ambiente durante ni después de su operación. Utiliza los principios de la ingeniería sistemática y de alta precisión para confinar la basura en un área determinada que sea lo más pequeña posible, cubriéndola con tierra diariamente y compactándola para reducir su volumen. Además prevé los problemas que puedan causar los líquidos percolados y gases producidos en el relleno por efecto de la descomposición de la materia orgánica. Según Trajo (1994) el relleno sanitario es la opción más antigua para la deposición final de desechos sólidos, pero que en un futuro dejará de ser la única opción de deposición final de los grandes asentamientos urbanos, debido a la creciente cantidades de desechos generados y el surgimiento de nuevas técnicas para reducir los costos.

Por otra parte, cada día aumenta aun más la dificultad para encontrar sitios apropiados para su establecimiento, bajo la exploración del territorio con las técnicas convencionales, requiriendo de la incorporación de técnicas de evaluación territorial mas sistemáticas como la incorporación de sistemas de información geográfica (SIG). El relleno sanitario, es uno de los métodos más antiguos de eliminación de desechos, remontando sus orígenes a tiempos bíblicos (Trajo, 1994). En nuestro continente su uso se popularizó cuando en los Estados Unidos se utilizaron hondonadas para rellenarlas con desechos, hasta que en los años cuarenta se difundió por todo el mundo (Trajo, 1994).

Podemos definir que un relleno sanitario es una técnica de ingeniería integral de confinamiento y de deposición final de los residuos sólidos urbanos, cuyo sitio de selección debe encontrarse en terrenos marginales, relativamente cercanos al perímetro de la población pero fuera de este, buscando siempre que el valor del predio, el transporte, los daños ambientales y sociales sean siempre al mínimo costo.

De acuerdo Rodríguez (1992) el relleno sanitario es una alternativa técnica y económica para poblaciones de hasta 70,000 habitantes, que requiere para su operación de equipo pesado para la adecuación del sitio y construcción de vías internas o la excavación del material de cobertura. Mancheno (1997) enumeró los siguientes beneficios del uso de los rellenos sanitarios como método para la eliminación de los desechos sólidos: a) reducción de la contaminación ambiental, b) alarga la vida útil del terreno para el depósito de basuras, c) disminución de la proliferación de enfermedades por vectores, d) conservación de la estética, e) aseguramiento de la calidad de aguas in-situ y zonalmente, f) buena relación entre vecinos (evita o disminuye conflictos sociales) y g) se evita la molestia por insectos. El funcionamiento de un relleno debe apegarse a los más sólidos principios de la ingeniería como diseño de drenajes, perforación de trincheras, rutas de acceso y compactación adecuada para garantizar su buen funcionamiento.

En la actualidad se busca que el relleno sanitario (vertedero sanitario) sea el confinamiento final de los RSU en el suelo, que no cree molestias ni peligros para la salud

pública, y que permita minimizar los riesgos ambientales. Los actuales RSU ubicados sobre sitios geológicos aptos (Flores, 2013; Barradas, 2009) son recubiertos con arcilla o plástico antes de verter los residuos, el fondo está cubierto por una segunda capa impermeable (de arcilla o plástico grueso) que recoge los lixiviados para evitar la infiltración, estos a su vez son bombeados desde el fondo del relleno sanitario a tanques de almacenamiento, para ser enviados a una planta de tratamiento de aguas residuales. En cambio, el biogás generado producto de la descomposición de los residuos pueden ser aprovechados para la generación de electricidad (Tobón, 2013).

En México existen dos tipos de relleno sanitario conocidos como: relleno sanitario tradicional y relleno sanitario manual. En un relleno sanitario tradicional, el suelo del sitio seleccionado es recubierto con materiales geosintéticos (polietileno y bentonita) o bien si las características geológicas *in-situ* son barreras naturales (*e. g.*, suelos arcillosos, arcillas superplásticas, tepetate) el suelo es compacto. En este tipo de rellenos se construyen celdas sobre las que se depositan los desperdicios sólidos en capas con un espesor de 30 a 40 cm, una vez cubierta la superficie se compacta la capa de residuos y se cubre con una capa de material confinante (*e. g.*, suelo, arcillas) de 10 a 15 cm de espesor, después de 3 meses se comienza una nueva celda sobre las anteriores (Flores, 2013).

Una vez inician las operaciones, es necesario monitorear con pozos de control posibles infiltraciones de lixiviados y evitar la contaminación de las aguas subterráneas. Por otra parte, el método de relleno sanitario manual (apropiado para poblaciones < 40,000 habitantes, o con producción de residuos $\leq 20,000$ toneladas por día) emplea la mano directa del hombre usando herramientas manuales para la compactación y confinamiento de los residuos, así como de todas sus operaciones (Jaramillo, 2002). Al igual que en el relleno sanitario tradicional, el sitio es impermeabilizado con la depositación de arcillas o tepetate que se compacta mecánicamente, rodeando el sitio con la siembra de árboles o arbustos propios de la región (Van *et al.*, 2002).

2.5 Rellenos Sólidos Urbanos (RSU)

Los residuos sólidos urbanos (RSU) son producidos en las casas habitación, como resultado de la eliminación de materiales no útiles para su dueño (basura). El manejo o disposición inadecuada de estos desperdicios, puede traducirse muy fácilmente en efectos ambientales severos. Los principales problemas asociados con el manejo irresponsable de los RSU son: contaminación de suelo, de aguas superficiales y de aguas subterráneas, como resultado directo de la infiltración de lixiviados producidos por estos desechos. También producen daños estéticos, tanto en el paisaje natural como en las ciudades, ocasionando la devaluación de predios y áreas vecinas donde exista la acumulación de residuos. El 5 de enero de 2004, a nivel nacional, entro en vigor la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) que define a la gestión integral de residuos como:

"el conjunto articulado e interrelacionado de acciones normativas, operativas, sociales, educativas, de monitoreo, supervisión y evaluación, para el manejo de residuos, desde su generación hasta la disposición final, a fin de lograr beneficios ambientales, la optimización económica de su manejo y su aceptación social, respondiendo a las necesidades y circunstancias de cada localidad o región".

En 2003, la LGPGIR define que la disposición final es:

"la acción de depositar o confinar permanentemente residuos en sitios e instalaciones cuyas características permitan prevenir su liberación al ambiente y las consecuentes afectaciones a la salud de la población y a los ecosistemas y sus elementos".

2.6 Marco Normativo Legal de México

De forma general, el marco normativo legal, referente a los residuos sólidos urbanos en México, contempla leyes federales, estatales, municipales, reglamentos, acuerdos y normas, que buscan una normatividad clara para el aprovechamiento sustentable de los residuos, la conservación y restauración ambiental de los sitios dispuestos para su confinamiento. En el contexto internacional derivado de problemas ambientales cada vez más severos, se busca cumplir con los acuerdos firmados en materia ambiental

internacional de la Agenda 21, que dicta que cada país y ciudad establecerá sus programas para lograr establecer criterios para la disposición final adecuada de sus residuos de forma sustentable.

En el Artículo 115 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, en la Fracción III dice:

"que el manejo de los residuos sólidos urbanos corresponde a las autoridades municipales, tienen la facultad de proporcionar gratuitamente el servicio de limpia, la recolección, tratamiento y disposición final. También cuentan con la autonomía para expedir reglamentos relacionados con el servicio público de limpia".

La LGEEPA (Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, 2009), dictamina que: *los municipios tienen la facultad de aplicar disposiciones jurídicas referentes a la prevención y control de los efectos sobre el ambiente ocasionados por la generación, transporte, almacenamiento, manejo, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos.* La NOM-083-SEMARNAT-2003 establece los criterios de protección ambiental para la selección del sitio, diseño construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias para un sitio de disposición final.

2.7 Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en la identificación de sitios potenciales para ubicación de rellenos sanitarios

Durante las últimas tres décadas el desarrollo del hardware ha favorecido de forma análoga la creación de software cada vez más eficiente para el usuario, pero al mismo tiempo más complejo y robusto en sus algoritmos. Ello ha favorecido manejar inmensas cantidades de información en bases de datos dinámicas, que favorecen el análisis espacial de un territorio en forma más precisa. Este es el caso de los sistemas de información geográfica (SIG) que permiten evaluar de forma simultánea distintas temáticas y variables asociadas a ellas, de una o varias áreas de estudio. La capacidad de los SIG para la combinación de datos espaciales (imágenes de satélite, ortófonos, mapas y fotografías) de forma cuantitativa y cualitativa, hacen de esta técnica una poderosa herramienta casi

indispensable actualmente para la relocalización de sitios estratégicos para el establecimiento de rellenos sanitarios (Molina *et al.*, 2007).

Una de las técnicas de evaluación más poderosas incorporadas a los SIG, en la identificación de sitios potenciales para la disposición final de residuos sólidos urbanos, es la técnica de Evaluación Multicriterio (EMC). La integración de los SIG y la EMC, permite desarrollar procedimientos de análisis simultáneos en dos componentes del dato geográfico, el espacial y el temático, brindando soluciones a problemas espaciales complejos (Flores, 2013). La MCE es un conjunto de técnicas que permiten evaluar diversas alternativas de elección de múltiples criterios y prioridades establecidas por el usuario en función de los factores y restricciones existentes. La MCE asiste los procesos de decisión, basado en una serie variables (factores) que pueden influir de forma positiva (Aptitud) o negativa (Impacto) sobre el objeto de decisión (Barredo, 1996).

Básicamente la evaluación multicriterio (EMC) se basa en la construcción de una matriz de decisión, que expresa las cualidades de la unidad de observación, caracterizadas por sus propios atributos. Una vez construida la matriz de decisión, es posible aplicar el procedimiento de evaluación necesario, que permita asignar un valor a cada alternativa disponible con el objetivo planteado de la evaluación. Así la integración de estos los SIG y EMC permite ejecutar procedimientos simultáneos de análisis en cuanto a los componentes espacial y temático, facilitando la obtención de soluciones a problemas espaciales complejos (Gómez y Barredo, 2005). Los SIG, actualmente son una herramienta crucial para facilitar y apoyar el proceso de toma de decisiones (a escala local y regional) para la selección de sitios potenciales para la ubicación de rellenos sanitarios y la planificación de su infraestructura.

Con la información presentada respecto al manejo, disposición actual y normas ambientales de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) es crucial aplicar una metodología sistemática, que permita evaluar de forma integral todos los criterios establecidos en la NOM-083-SEMARNAT-2003, ya que el manejo exitoso presente y futuro de los RSU en la sub-cuenca de Nexapa (Puebla) depende de la adecuada valoración espacial del territorio.

3. Metodología

La geolocalización de sitios potenciales para el establecimiento de rellenos sanitarios, serán determinados de forma sistemática y cuantitativa (Maximiliano, 2015, Flores, 2013, Tobón, 2013, Zafra, 2012, Paz, 2011) a partir del método multivariante (EMC) combinado con sistemas de información geográfica (SIG) tomando los criterios establecidos en la vigente NOM-083-SEMARNAT- 2003. La metodología para determinar los sitios potenciales para la disposición final de los residuos sólidos urbanos (RSU) fue la siguiente:

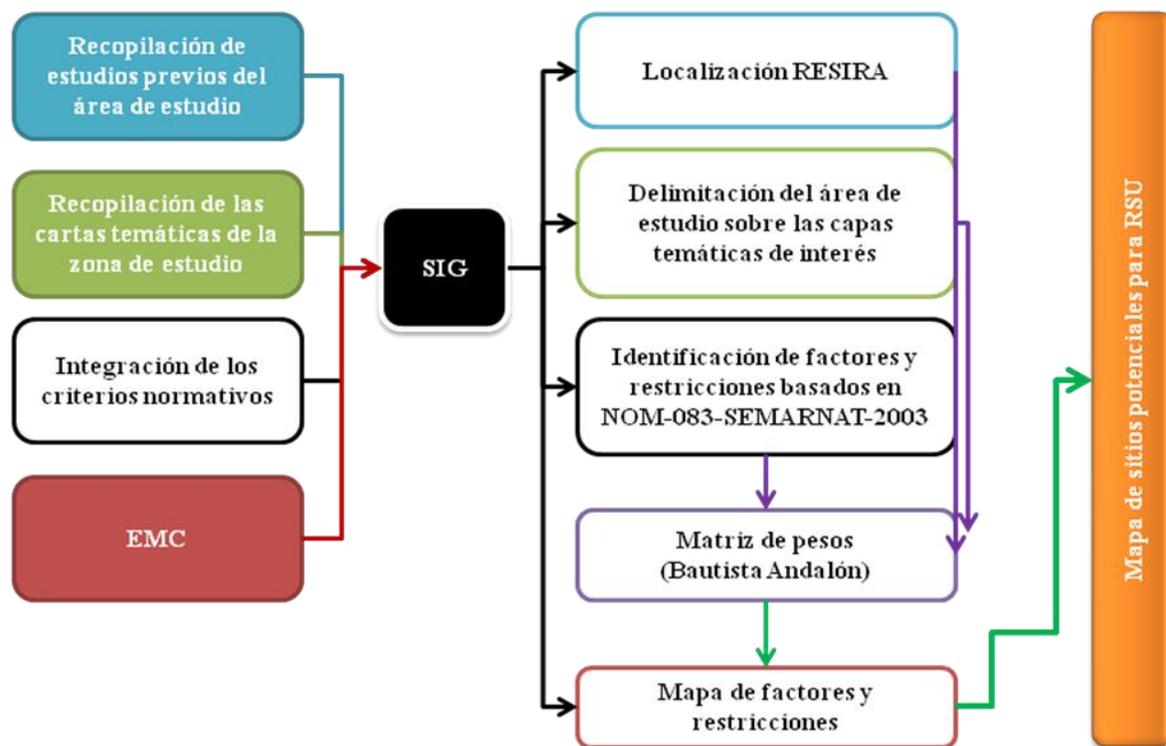


Figura 2. Esquema metodológico para la geolocalización de sitios potenciales para la deposición final de residuos sólidos urbanos.

3.1 Recopilación de la información

En primer lugar, se consultó la información disponible del RESPA así como el trabajo de Tobón (2013), para conocer las características y ubicación de este relleno sanitario. Con el propósito de tener un punto de calibración (necesario para valorar *in-situ* si los resultados obtenidos en el mapa de zonificación, son congruentes con la realidad) con respecto a la evaluación de sitios potenciales para la posible implementación de RSU. Apegado a lo establecido en la norma NOM-083-SEMARNAT-2003, se recopilaron las cartas temáticas e información: hidrología, geohidrológica, edafología, uso del suelo, cuencas y subcuencas, fallas y fracturas, localidades, municipios, división política, carreteras, áreas naturales protegidas, censo de pozos, población, zonas de inundación, precipitación y clima. Todas las cartas temáticas utilizadas han sido tomadas de fuentes gubernamentales oficiales (SEMARNAT, INEGI, CONABIO, SGM, SIAT, CNA, CONAPO) en su última versión. Para obtener un modelo de la superficie del territorio a escala regional, el mapa de pendientes y las curvas de nivel, se utilizó el modelo digital de elevaciones (MDE) del INEGI (2013).

3.2 Delimitación del área de estudio

El criterio para limitar la zona de estudio se basó en:

- La ubicación a escala de cuenca; en este caso pertenece a la cuenca del Balsas.
- La regionalización a escala de sub-cuenca, de acuerdo a la división de sub-cuenca nacionales de la CONAGUA (2015). La región de interés pertenece a la subcuenca Nexapa.
- Los límites territoriales municipales y acuerdos administrativos ya establecidos para RESIRA.

Con esta limitación territorial se trataron todas las demás capas temáticas y análisis multicriterio (EMC) en esta investigación.

3.3 Integración de criterios normativos

Los criterios para la selección de variables han sido tomados a partir de las consideraciones dictadas por la norma: NOM-083-SEMARNAT-2003. Existen dos tipos de criterios para un análisis multicriterio (EMC) que son: factores y restricciones, a los cuales dependiendo su importancia se asigna un peso ponderado (Bautista *et al.*, 2010, Flores, 2013, Silva, 2006, Paz 2011, Roe Sosa, 2014). La Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003, contiene los siguientes factores específicamente a cumplir para la selección del sitio designado para la construcción de un relleno sanitario:

- a) Los sitios de disposición final tienen que ubicarse a una distancia mínima a 13 km de pistas de aeródromos.
- b) En localidades mayores a 2500 habitantes, el límite del sitio de disposición final debe ubicarse a una distancia mínima de 500 m contados a partir de la traza urbana existente o contemplada en el plan de desarrollo urbano.
- c) Los sitios de disposición final tienen que ubicarse a una distancia mínima de 500 m de las aguas superficiales (ríos) con caudal continuo, lagos y lagunas.
- d) La ubicación entre el límite del sitio de disposición final y cualquier pozo de extracción de agua para uso doméstico, industrial, riego y ganadero, tanto en operación como abandonados, será de 100 metros adicionales a la proyección horizontal de la mayor circunferencia del cono de abatimiento. Cuando no se pueda determinar el cono de abatimiento, la distancia no será menor de 500 metros.

Al mismo tiempo, la norma contempla restricciones específicas que son:

- a) Los sitios de disposición final no tienen que ubicarse en áreas naturales protegidas (ANP), solamente que estén contemplados en el plan de manejo.
- b) Los sitios de disposición final no tienen que ubicarse en zonas de marismas, manglares, esteros, pantanos, humedales, estuarios, planicies aluviales, fluviales, recarga de acuíferos; zonas arqueológicas, ni sobre cavernas, fracturas o fallas geológicas.

- c) Los sitios de disposición final no tienen que ubicarse en zonas de inundación con periodos de retorno a 100 años.

3.4 Método Multicriterio (EMC)

El método multicriterio (EMC) se utiliza para evaluar diversas posibles soluciones, donde se consideran distintas variables y criterios (Flores, 2013). Es una poderosa herramienta para apoyar la toma de decisiones durante la planificación de un territorio y elegir una solución óptima (Flores, 2013). El método multicriterio se basa en la construcción de una matriz de alternativas de elección a partir de una serie de criterios. La matriz expresa las cualidades de la alternativa con respecto a "n" atributos. El conjunto de elección se refiere al conjunto de alternativas o entidades geográficas diferentes, caracterizadas por una serie de atributos, que cuando se les añade un mínimo de información relativa a las preferencias del decisor se consideran criterios (Giménez y Cardozo, 2012; Herrera, 2014). Una vez construida la matriz de decisión es posible aplicar algún procedimiento de evaluación que permita asignar a cada alternativa un valor que refleje la medida en que dicha alternativa cumple con el objetivo planteado en la evaluación (Flores 2013).

La evaluación multicriterio (EMC) se basa en la construcción de una matriz de decisión, que expresa las cualidades de la unidad de observación, caracterizadas por sus propios atributos. Una vez construida la matriz de decisión, es posible aplicar el procedimiento de evaluación necesario, que permita asignar un valor a cada alternativa disponible con el objetivo planteado de la evaluación. Así la integración de los SIG y EMC permite ejecutar procedimientos simultáneos de análisis en cuanto a los componentes espacial y temático, a partir del uso de herramientas como álgebra de mapas o superposición en software como ArcGIS (usado en esta tesis), facilitando la obtención de soluciones a problemas espaciales complejos (Flores-Salazar, 2013). Los SIG, actualmente son una herramienta crucial para facilitar y apoyar el proceso de toma de decisiones (a escala local y regional) para la selección de sitios potenciales para la ubicación de rellenos sanitarios y la planificación de su infraestructura.

4. Resultados

Al analizar la información temática disponible oficial al respecto, en la Figura 3 se presentan las restricciones (en rojo) y factores (en verde) que están presentes en el área de investigación de acuerdo a lo establecido en Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003.



Figura 3. Restricciones y factores considerados para la geolocalización de sitios potenciales para el establecimiento de RSU, extraídos de la NOM-083-SEMARNAT-2003.

Otro factor que se consideró en esta investigación fue la pendiente del terreno, para este tema la NOM-083-SEMARNAT-2003 no aporta especificaciones. Sin embargo de acuerdo con Bautista *et al.* (2010) la pendiente se medirá en porcentaje, en este trabajo el mapa de pendientes se ha obtenido a partir del modelo digital de elevaciones (MDI; INEGI, 2015) a partir del que se elaboraran las curvas de nivel.

El peso de los factores, ha sido tomado y adaptada de la matriz de pesos ponderados de variables de terreno propuesta por Bautista *et al.* (2010) para ubicar un relleno sanitario, construida para México. En la región analizada en esta tesis, solo se han detectado 11

criterios que se han considerado para evaluar las características espaciales del territorio (Tabla 1).

Tabla 1. Matriz de ponderación de variables de terreno para ubicar un RSU.

No.	Factor de campo	Ponderación 1		Ponderación 2		Ponderación 3	
1	Uso de suelo y vegetación	Asentamiento humano, selvas, vegetación halófila y bosques	1	Palmar, agricultura de riego o de humedad	2	Mezquital, matorral subtropical	3
2	Localidades urbanas y rurales	≤ 500 m de una localidad > 10 habitantes	1.9	A distancia de 500 a 1,000 m	3.8	Entre 1,000 y 1,500 m	5.7
3	Camino	Camino a más de 2,000 m	1.1	Camino entre 1,500 y 2,000 m	2.2	Camino entre 1,000 y 1,500 m	3.3
4	Carreteras	Predios ubicados a menos de 500 m de una carretera	1.2	Predios ubicados a más de 2,000 m	2.4	Predios ubicados entre 1000 y 1500 m	3.6
5	Pendiente (topografía)	60-90 grados	1.8	40-60 grados	3.6	25-40 grados	5.4
6	Inundaciones	A menos de 500 m	1	Entre 500 y 1000 m	2	De 1000 a 1500 m	3
7	Fallas y fracturas	A menos de 500 m	2	Entre 500 y 1000 m	4	De 1000 a 1500 m	6
8	Pozos de agua	De 0 a 500 m	1	De 500 a 600 m	2	De 600 a 700 m	3
9	Ríos	A menos de 500 m	2.1	A una distancia de entre 500 y 700 m	4.2	A una distancia de 700 y 1,000 m	6.3
10	Arroyos	A menos de 100 m	1.1	Ubicados entre 100 y 300 m de distancia	2.2	Distancias de 300 a 500 m	3.3
11	Cuerpos de agua	Los predios que se encuentran a menos de 500 m	2.1	Ubicados a una distancia de entre 500 y 700 m	4.2	Los sitios a una distancia de 700 a 1,000 m	6.3

No.	Factor de campo	Ponderación 4		Ponderación 5	
1	Uso de suelo y vegetación	Áreas con riego suspendido, pastizal cultivado	4	Área sin vegetación, agricultura de temporal, pastizal inducido	5
2	Localidades urbanas y rurales	Entre 1,500 y 2,000 m	7.6	Mayor a 2,000 m	9.5
3	Camino	Camino entre 500 y 1,000 m	4.4	Camino a menos de 500 m	5.5
4	Carreteras	Predios ubicados entre 1500 y 2000 m	4.8	Predios ubicados entre 500 y 1000 m	6
5	Pendiente (topografía)	10-25 grados	7.2	0-10 grados	9
6	Inundaciones	De 1500 a 2000 m	4	Mayor de 2000 m	5
7	Fallas y fracturas	De 1500 a 2000 m	8	Mayor de 2000 m	10
8	Pozos de agua	De 700 a 800 m	4	A más de 800 m	5
9	Ríos	Ubicados entre 1,000 y 1,500m de distancia	8.4	A más de 1,500 m	11
10	Arroyos	Los que se encuentran entre 500 y 700 m	4.4	Los que se encuentran a más de 700 m	5.5
11	Cuerpos de agua	Los ubicados entre 1,000 y 1,500 m	8.4	Predios ubicados a más de 1,500 m	11

Tomado y adaptado de Bautista *et al.* (2010).

A continuación se presentan las variables asignadas (Bautista *et al.*, 2010; Tabla 2) para cada capa temática, los resultados obtenidos de factores y restricciones, y su combinación a partir de la función Algebra de Mapas en ArcGIS 10.1, y el mapa final de aptitud obtenido, en el cual se geolocalizan los sitios potenciales para la disposición final de residuos sólidos urbanos (RSU), esto conforme a la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003, a partir de la sumatoria de cada capa temática (álgebra de mapas) mediante la asignación de pesos ponderados.

Tabla 2. Variables ponderadas por peso, para las distintas capas temáticas.

Uso de Suelos		
Clase	Simbología	Ponderación de Variables
Agricultura de Temporal	AG-T	5
Agricultura de Riego	AG_R	2
Pradera Alta de Montaña	PrM	3
Pastizal Inducido	PzI	4
Selva Baja	S	1
Bosque	B	1
Sin Vegetación	NV	5
Zona Urbana	Urb	1

Inclinación de la Pendiente	
Rango en %	Ponderación de Variables
60-90	1.8
40-60	3.6
25-40	5.4
10--25	7.2
0-10	9

Distancia a Límites con Principales Poblaciones	
Rango en m	Ponderación de Variables
0-500	1.9
500-1000	3.8
1000-1500	5.7
1500-2000	7.6
2000-2500	9.5
>2500	9.5

Distancia a Principales Caminos	
Rango en m	Ponderación de Variables
0-500	5.5
500-1000	4.4
1000-1500	3.3
1500-2000	2.2
2000-2500	1.1
>2500	1

Distancia a Principales Carreteras	
Rango en m	Ponderación de Variables
0-500	1.2
500-1000	6
1000-1500	3.6
1500-2000	4.8
2000-2500	2.4
>2500	2.4

Distancia a Fallas y Fracturas	
Rango en m	Ponderación de Variables
0-500	2
500-1000	4

1000-1500	6
1500-2000	8
2000-2500	10
>2500	10

Distancia a Pozos	
Rango en m	Ponderación de Variables
0-500	1
500-600	2
600-700	3
700-800	4
800-1000	5
>1000	5

Distancia a Zonas de Inundación	
Rango en m	Ponderación de Variables
0-500	1
500-1000	2
1000-1500	3
1500-2000	4
2000-2500	5
>2500	5

Distancia a Ríos	
Rango en m	Ponderación de Variables
0-500	2.1
500-700	4.2
700-1000	6.3
1000-1500	8.4
1500-2000	11
>2000	11

Distancia a Zonas de Inundación	
Rango en m	Ponderación de Variables
0-500	1
500-1000	2
1000-1500	3
1500-2000	4
2000-2500	5
>2500	5

Distancia a Corrientes de Agua	
Rango en m	Ponderación de Variables
0-100	1.1
100-300	2.2
300-500	3.3
500-700	4.4
700-1000	5.5
>1000	5.5

Distancia a Cuerpos de Agua	
Rango en m	Ponderación de Variables
0-500	2.1
500-1000	4.2
1000-1500	6.3
1500-2000	8.4
2000-2500	11
>2500	11

Inclinación de la Pendiente	
Rango en °	Ponderación de Variables
60-90	1.8
40-60	3.6
25-40	5.4
10--25	7.2
0-10	9

4.1 Mapas de Factores y Restricciones

Se obtuvieron un total de 11 mapas temáticos de los cuales 6 son factores y 5 restricciones, que a continuación se presentan:

4.1.1 Mapa de Uso de Suelos

El mapa de uso de suelos, ha sido elaborado a partir de la carta Unión 250 del INEGI (2013), este contiene la información del actual uso de suelo registrado, que fue cuantificado a partir de la clasificación no supervisada, basada en imágenes de satélite LANDSAT 7. Para la región de la sub-cuenca de Nexapa, se cuenta con información de 9 clases (Figura 4), y se han añadido 3 más (RESIRA, Carreteras y Caminos) para poder evaluar el uso de suelo de forma integral en la región de estudio.

Mapa de Uso de Suelos de la Sub-cuenca de Nexapa, Puebla

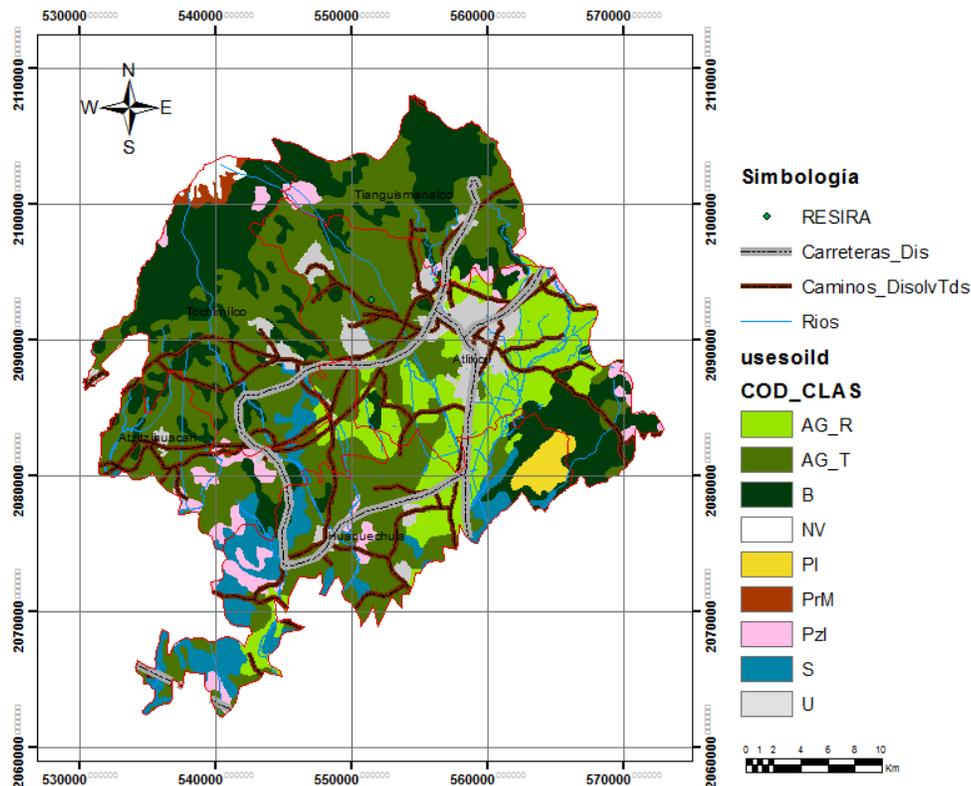


Figura 4. Mapa de uso de suelos, se han simplificado las clases agrícola y tipo de bosque (elaboración propia a partir de información de INEGI, 2016).

Simbología: Pas= pastizal, AG_R= agricultura de riego, AG_T= agricultura de temporal, B= bosque, U= urbano, Prm=pradera de monte, S=selva, NV= sin vegetación; RESIRA= Relleno sanitario intermunicipal de Atlixco; Carreteras_Dis= Carreteras; Caminos_DisolvTds= Caminos

4.1.2 Mapa de Localidades Urbanas y Rurales

La distribución de la población y la extensión poligonal de la mancha urbana, es una de las variables a considerar de suma importancia para establecer las zonas de restricción (zonas Buffer). El mapa de localidades urbanas y rurales (Figura 5) se elaboró de combinar, la información del Censo de Población de INEGI (2015), los shapefile de uso del suelo de CONABIO (2011) INEGI (2013) y una clasificación supervisada sobre imágenes de Google Earth de la región, así como el archivo de puntos geolocalizados de localidades (INEGI, 2015).

Mapa de Localidades Urbanas y Rurales de la sub-cuenca de Nexapa, Puebla

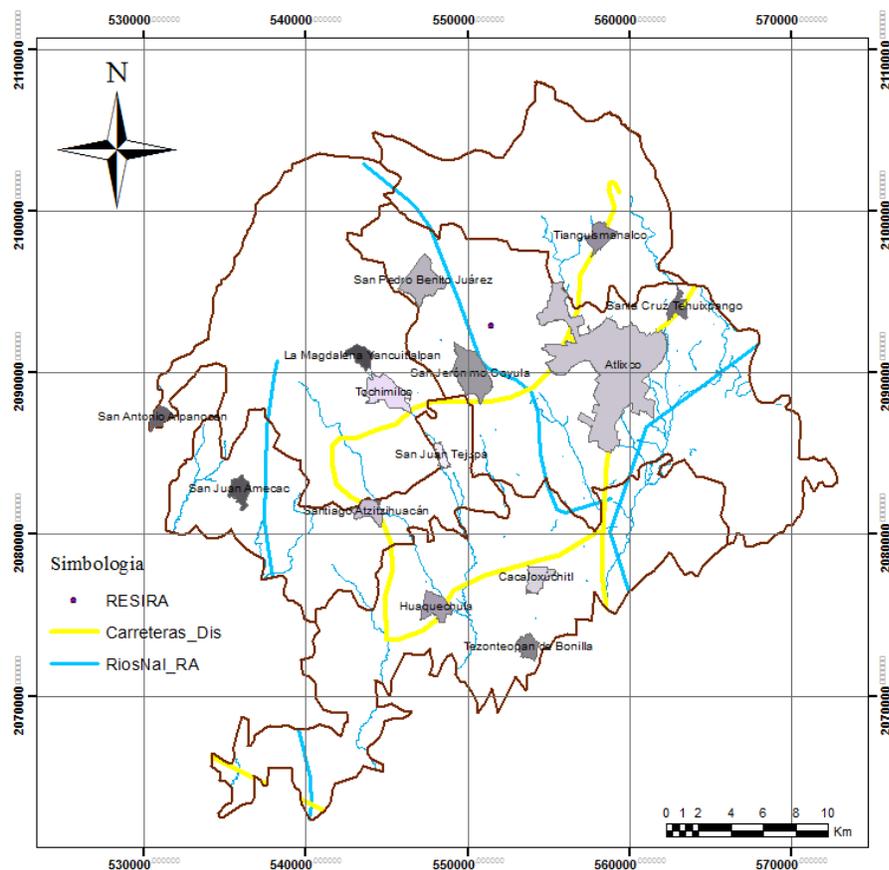


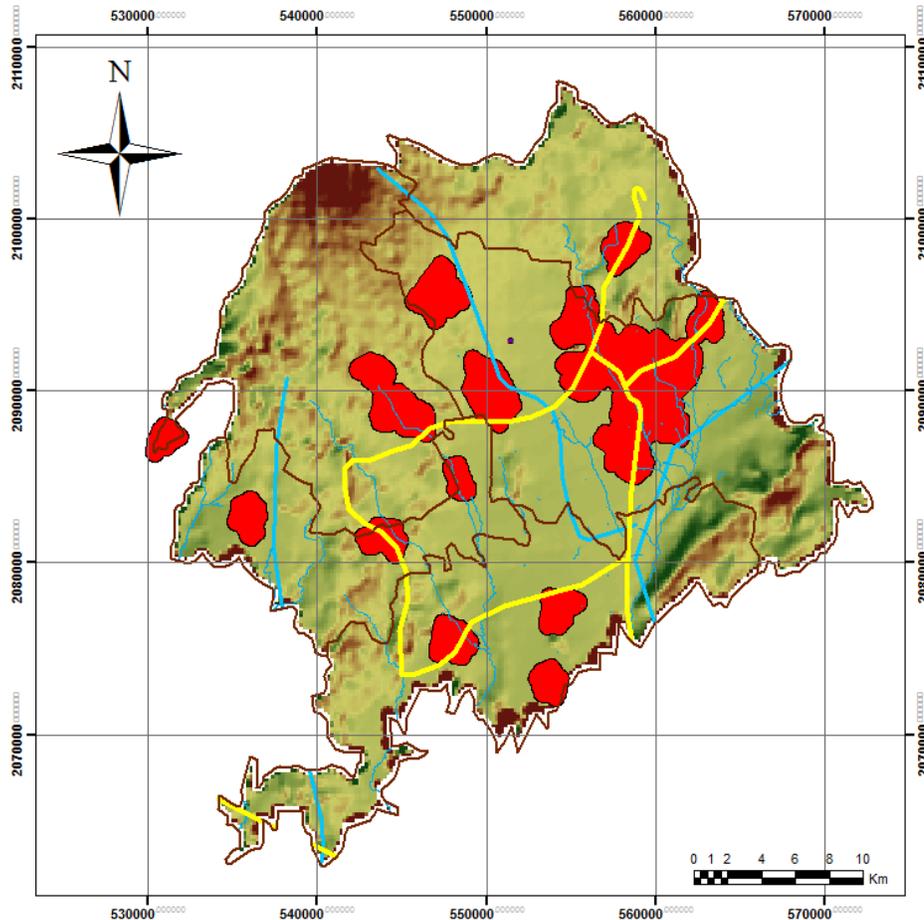
Figura 5. Mapa de principales poblaciones urbanas (elaboración propia a partir de información de INEGI, 2016).

Simbología: RESIRA= Relleno sanitario intermunicipal de Atlixco; Carreteras_Dis= carreteras; RiosNal_RA= Ríos y arroyos de la región.

4.1.3 Mapa de Zona de Restricción de Localidades

A partir del mapa de localidades urbanas y rurales, se construyó la zona de restricción zonal de 1000 m (zonas Buffer de localidades) alrededor de los polígonos localizados de asentamientos urbanos o rurales (Figura 6). Estas zonas, son completamente descartadas y extraídas para la evaluación en del mapa de aptitud del territorio, ya que son sitios que conforme a la NOM-083-SEMARNAT-2003, no pueden ser considerados por ningún motivo, como sitios potenciales para la colocación de un Relleno Sanitario.

Mapa de Zona de Restricción de Localidades



Simbología

- RESIRA
- Carreteras_Dis
- RiosNal_RA
- Zonas

Figura 6. Mapa zonal de restricción de 1000 m a las poblaciones urbanas (elaboración propia a partir de información de INEGI, 2016).

Simbología: RESIRA= Relleno sanitario intermunicipal de Atlixco; Carreteras_Dis= carreteras; RiosNal_RA= Ríos y arroyos de la región.

4.1.4 Mapa de distancias de caminos y carreteras

La NOM-083-SEMARNAT-2003 establece que la ubicación de un Relleno Sanitario debe estar a partir de 500 m de caminos y carreteras. Sin embargo, al incrementar la distancia el costo de operación es más alto ya que a mayor distancia aumenta el gasto de combustible y el desgaste del parque vehicular. Por otra parte, cuando se localiza un sitio que no cuenta con carreteras o caminos ya realizados, hay que efectuar la obra. Partiendo de la capas de caminos y carreteras (SCT, 2015; INEGI, 2016) se construido el mapa de zonación de distancias de caminos y carreteras de la sub-cuenca de Nexapa (Figura 7), Puebla, donde la región que comprende de 0 a 500 m, se extraerá como zona Buffer (es decir completamente restringida, o de valor 0, en la matriz de pesos ponderados) y siendo las regiones entre 500 y 2000 m de distancia, las de mayor interés (o con valores más altos en la matriz de pesos ponderados).

Mapa de distancias de caminos y carreteras

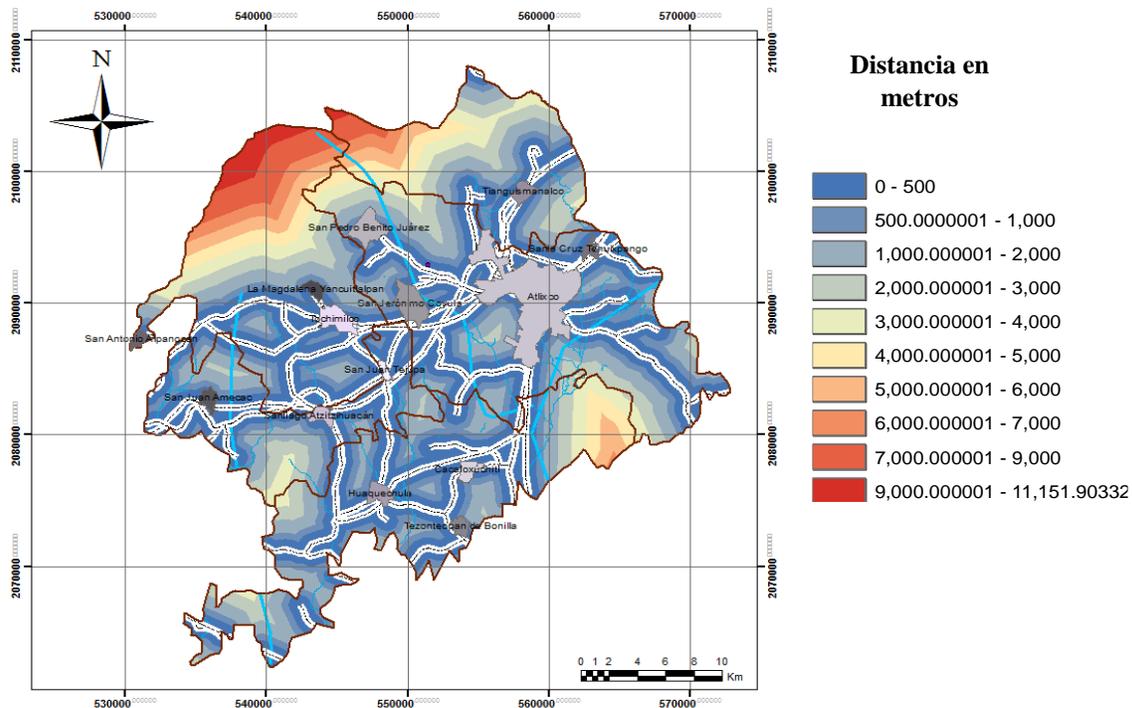


Figura 7. Mapa de distancias a las poblaciones urbanas (elaboración propia a partir de información de INEGI, 2016; y SCT, 2015).

4.1.7 Mapa de Distancia de Restricción de Ríos, arroyos y Cuerpos de Agua

La zona de restricción que marca la actual NOM-083-SEMARNAT-2003, para ríos y cuerpos de agua es de 500 m. El mapa de distancia de restricción de ríos, arroyos y cuerpos de agua (Figura 10), se elaboró considerando los ríos, arroyos y cuerpos de agua perene. Sin embargo, los escurrimientos o ríos de temporal han sido excluidos de la zona Buffer generada, ya que no representan un factor de riesgo en la región si al elegir la zona óptima se realizan los trabajos de ingeniería pertinentes para canalizarlos y protegerlos.

Mapa de distancia de restricción de ríos, arroyos y cuerpos de agua

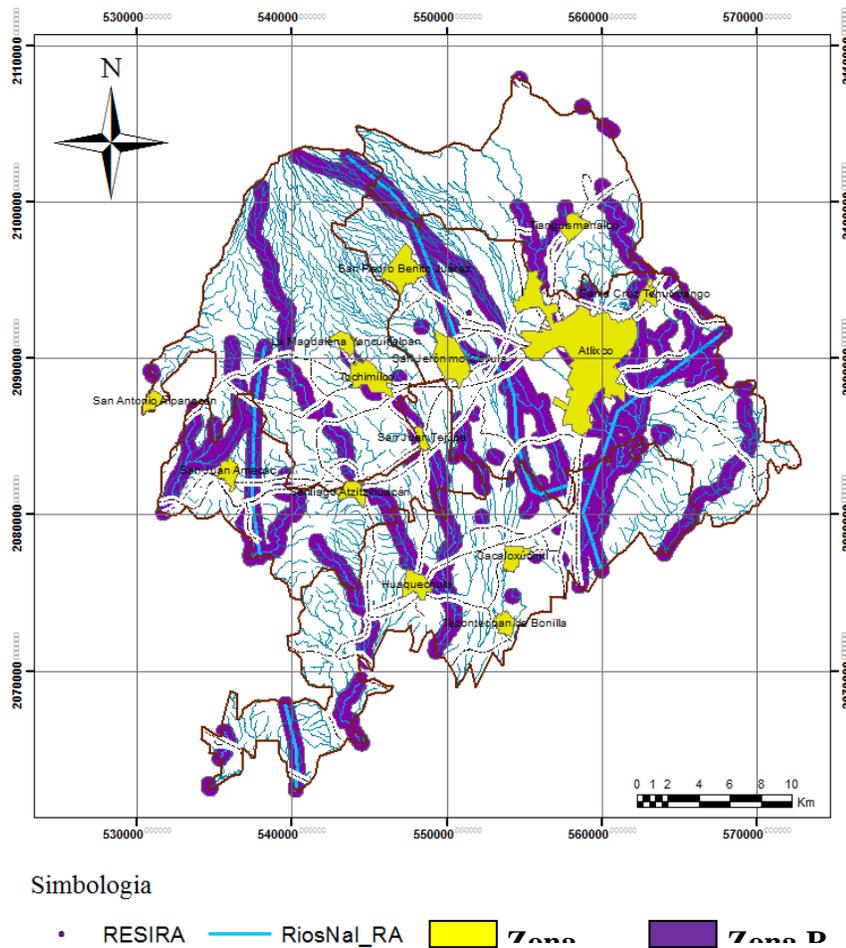


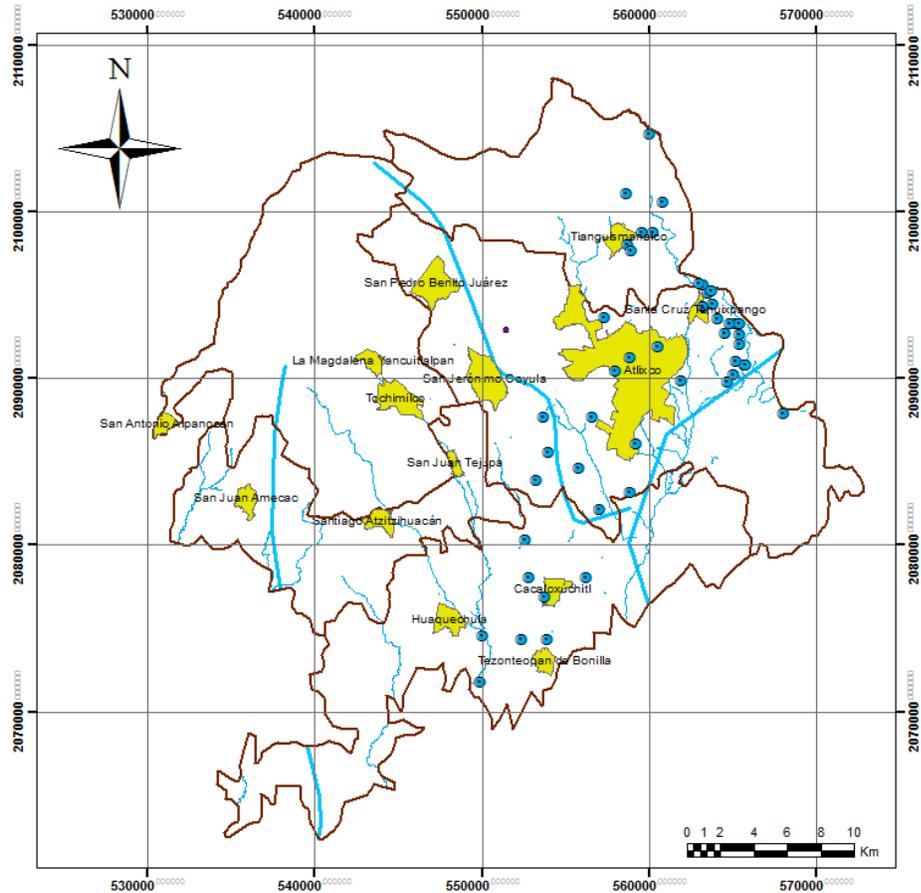
Figura 10. Mapa zonal de restricción a 500 m de los principales ríos y cuerpos de agua de la sub-cuenca Nexapa (elaboración propia a partir de información de INEGI, 2016).

Simbología: RESIRA= Relleno sanitario intermunicipal de Atlixco; RiosNal_RA= Ríos y arroyos de la región; Zona R= zona restringida

4.1.8 Mapa de Pozos

Uno de los principales factores de restricción que contempla la NOM-083-SEMARNAT-2003, es una zona de 500 m alrededor de los pozos, en el caso de la sub-cuenca de Nexapa el mapa de pozos (Figura 11), se elaboró a partir de la información disponible de la REDPA (CONAGUA, 2016).

Mapa de Pozos



Simbología

- RESIRA
- RiosNal_RA
- Pzo_RA

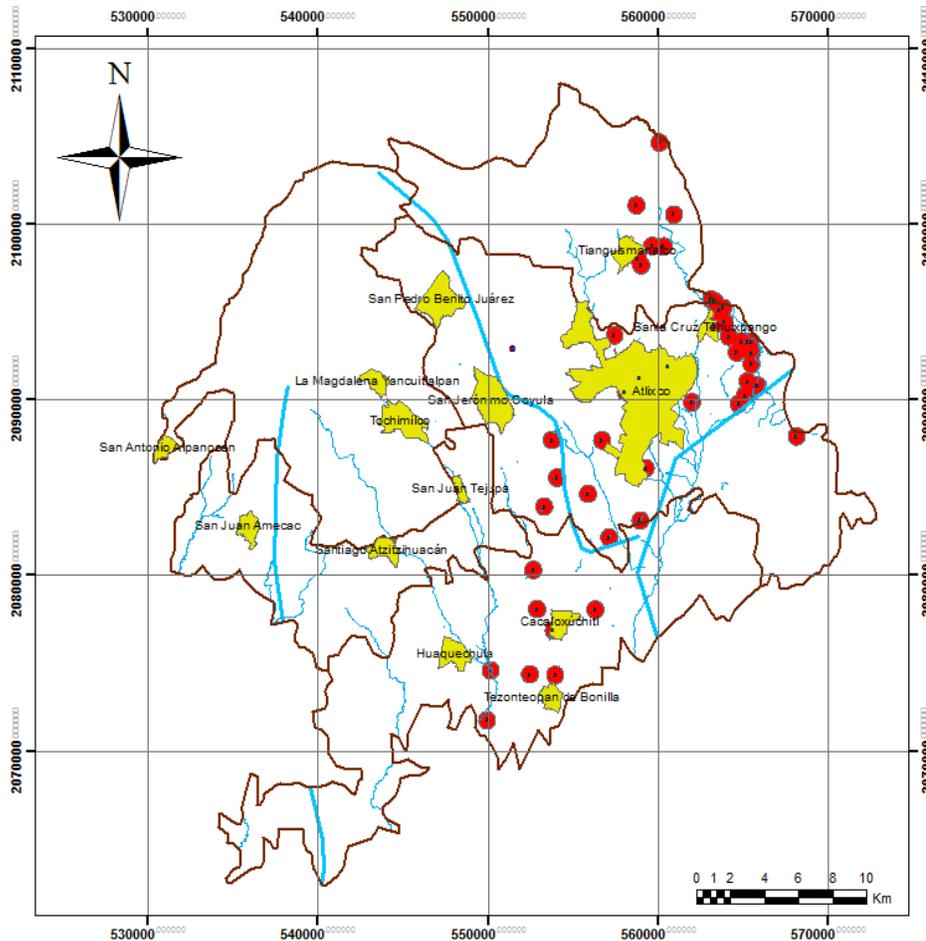
Figura 11. Mapa de pozos de la sub-cuenca Nexapa (elaboración propia a partir de información de CONAGUA, 2016).

Simbología: RESIRA= Relleno sanitario intermunicipal de Atlixco; RiosNal_RA= Ríos y arroyos de la región; Pzo_RA= Pozos de la región.

4.1.9 Mapa de distancia restrictiva de pozos

En la sub-cuenca de Nexapa, Puebla, se encuentran localizados los pozos que suministran a la Megalopolis Poblana en un 57 %, por ello ha pegado a la NOM-083-SEMARNAT-2003, se generó el mapa de distancia restrictiva de pozos (Figura 12), que es una zona Buffer de 500 m alrededor del pozo.

Mapa de distancia restrictiva de pozos



Simbología

- RESIRA
- RiosNal_RA
- Pzo_RA
- Zona R_Pzos

Figura 12. Mapa zonal de restricción en pozos de la sub-cuenca Nexapa (elaboración propia a partir de información de CONAGUA, 2016).

Simbología: RESIRA= Relleno sanitario intermunicipal de Atlixco; RiosNal_RA= Ríos y arroyos de la región; Pzo_RA= Pozos de la región; Zona R_Pzos 500m= Zona restringida de pozos 500m.

4.1.10 Mapa de Inundaciones

Con el propósito de evitar la migración de líquidos lixiviados por eventos de fuerte precipitación, a cuerpos de agua superficial, acuíferos subterráneos, parcelas de cultivo o tierras de pastoreo, se construyó el mapa de inundaciones (Figura 13), para la sub-cuenca de Nexapa, A partir de la información disponible en COANBIO (2016), para la región de estudio.

Mapa de Inundaciones

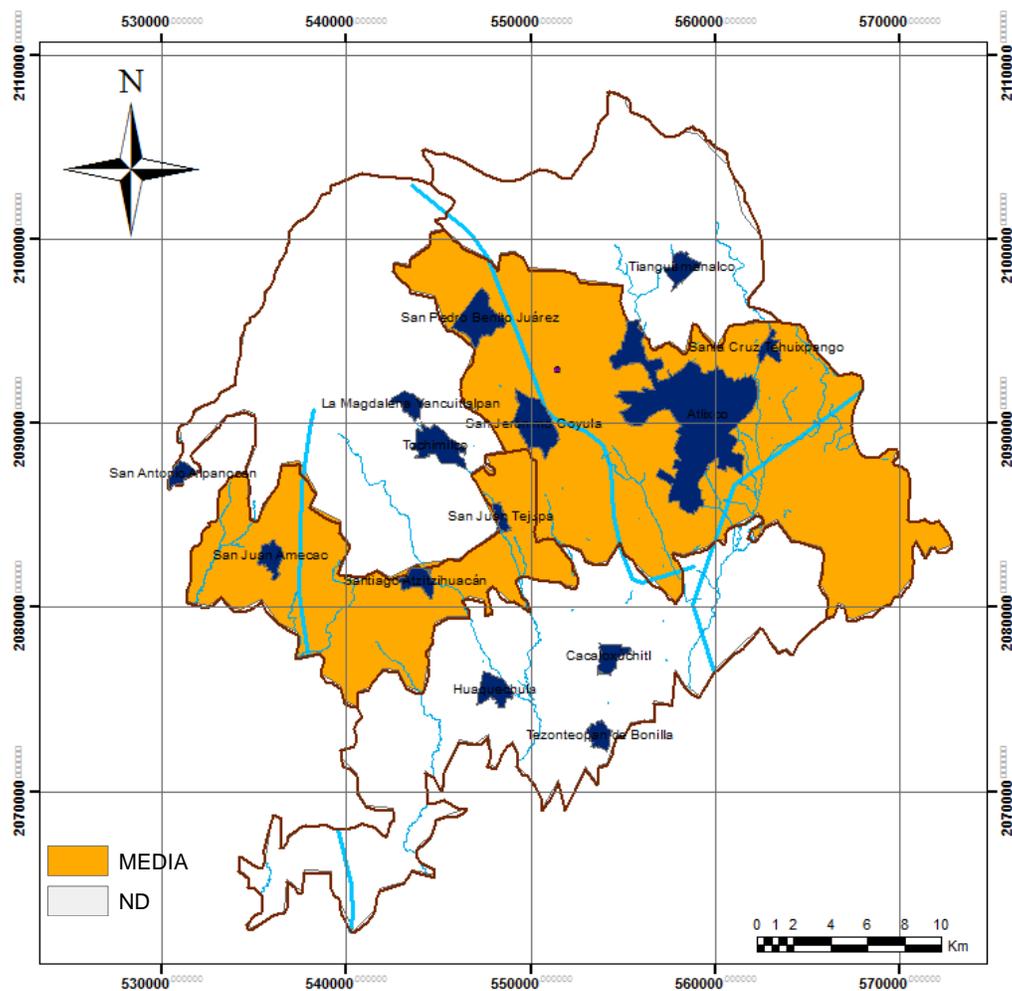


Figura 13. Mapa de inundaciones de la sub-cuenca Nexapa (elaboración propia a partir de información de CONABIO, 2016).

Simbología: MEDIA= zona de potencial inundación, con lamina capilar ≤ 1 m, durante periodo de máximos históricos de precipitación; ND= zona sin efectos históricos descritos de inundación.

4.1.11 Mapa de unidades Hidrogeológicas

Las propiedades hidrogeológicas como conductividad hidráulica ($K_{x,y,z}$) transmisibilidad ($Tr_{x,y,z}$) y porosidad, pueden favorecer o contener la migración de lixiviados, considerando lo anterior, con la información disponible de INEGI (2016) se identificó el material rocoso hidrogeológico y se elaboró el mapa de unidades hidrogeológicas (Figura 14). Con el propósito de evitar la migración de líquidos lixiviados a los acuíferos subterráneos, en los sitios donde se requiera posiblemente la colocación de geomembrana.

Mapa de unidades Hidrogeológicas

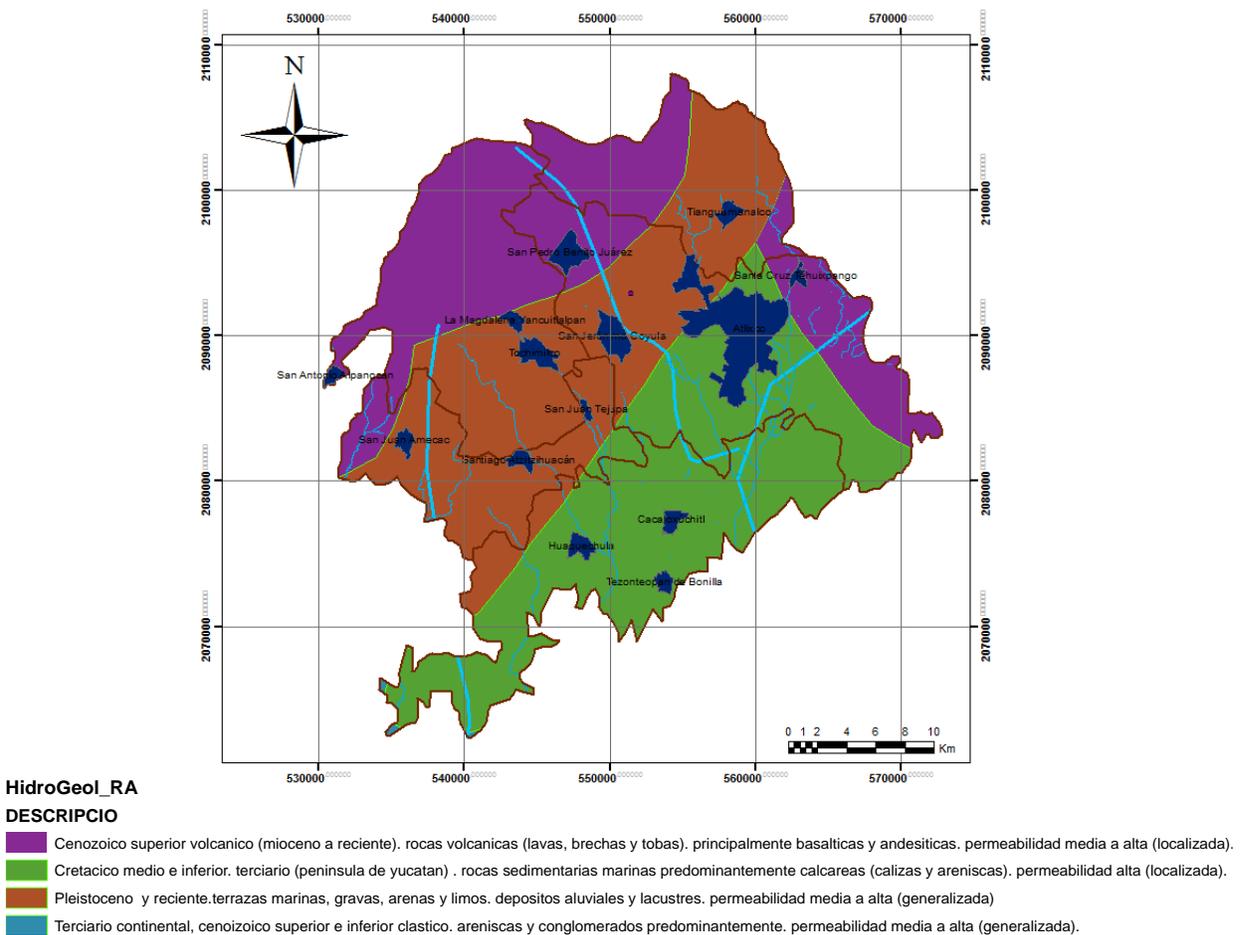


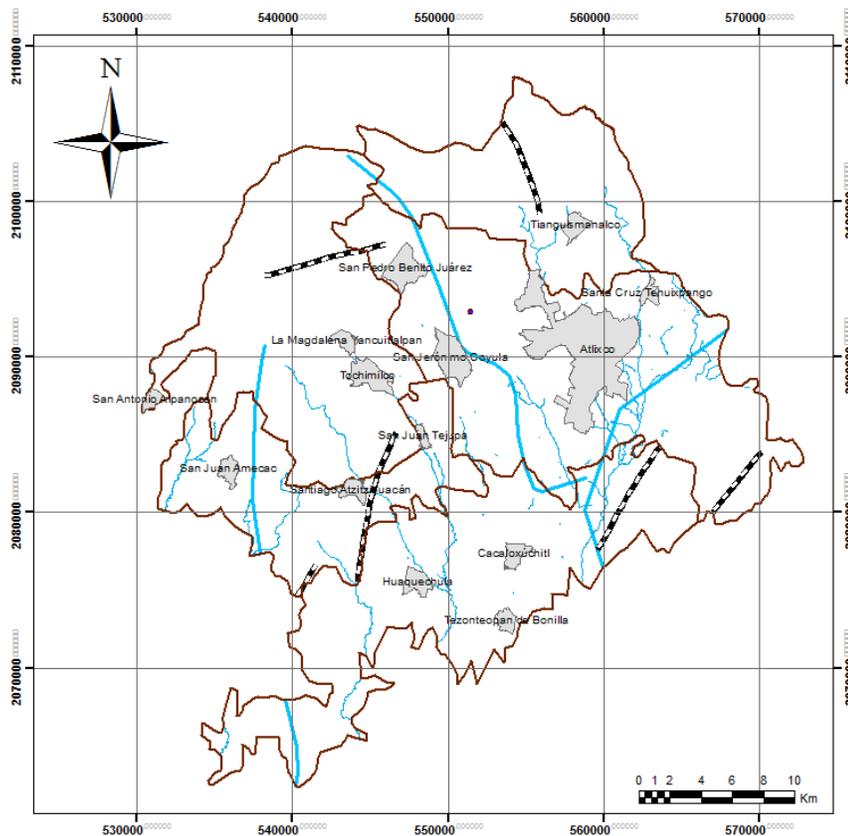
Figura 14. Mapa de unidades hidrogeológicas la sub-cuenca Nexapa (elaboración propia a partir de información de INEGI, 2016).

Simbología: HidroGeol_RA= Geohidrológica de la región de Atlixco

4.1.12 Mapa de Fallas y Fracturas

La sub-cuenca de Nexapa, no solo es controlada en su geomorfología por la presencia del volcán Popocatepetl y otros cuerpos ígneos extrusivos, existe en la región un conjunto de fallas geológicas y fracturas que modelan el paisaje superficial. El Mapa de Fallas y Fracturas (Figura 15), se ha elaborado con el propósito de evitar pérdidas económicas durante la construcción del Relleno Sanitario, perdidas económicas y humanas durante su operación y la contaminación potencial por la migración de lixiviados hacia las aguas subterráneas circundantes.

Mapa de Fallas y Fracturas



Simbología

- RESIRA
- RiosNal_RA
- Faults_RA

Figura 15. Mapa de fallas y fracturas geológicas de la sub-cuenca Nexapa (elaboración propia a partir de información de INEGI, 2016).

Simbología: RESIRA= Relleno sanitario intermunicipal de Atlixco; RiosNal_RA= Ríos y arroyos de la región; Faults_RA= Fallas y Fracturas de la región de Atlixco.

4.1.13 Mapa de distancias a principales zonas urbanas

El mapa de distancias a principales zonas urbanas (Figura 16), se desarrolló considerando que entre la distancia de 0 a 500 m, es la zona restrictiva del área Buffer. Sin embargo la región entre 500 y 2500 m tiene un alto interés, ya que en estas áreas la colocación de un Relleno Sanitario (RS) no afecta a los asentamientos urbanos o rurales (e. g., plagas, olores).

Mapa de distancias a principales zonas urbanas

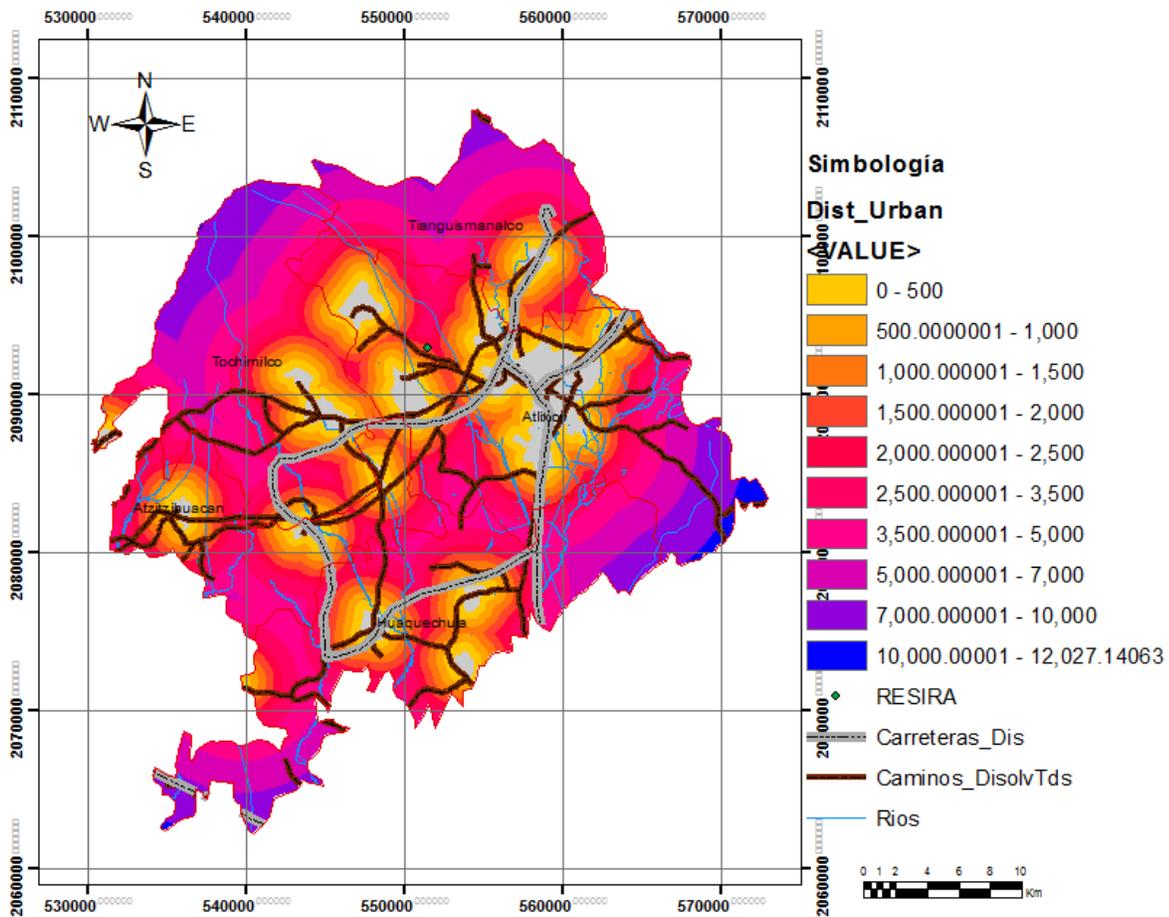


Figura 16. Mapa de distancias a las principales zonas urbanas en la sub-cuenca Nexapa (elaboración propia a partir de información de INEGI, 2016).

Simbología: RESIRA= Relleno sanitario intermunicipal de Atlixco; Carreteras_Dis= Carreteras; Caminos_DisolvTds= Caminos; Dist_Urban= Distancias urbanas.

4.1.14 Mapa de distancia a caminos y carreteras

Los mapas de distancias a caminos (Figura 17) y carreteras (Figura 18), se construyeron a partir de la información disponible de la SCT (2016) y el INEGI (2015). De acuerdo con la NOM-083-SEMARNAT-2003, el área de restricción (Buffer) se encuentra entre la distancia de 0 a 500. A partir de esta zonación, los sitios son viables, sin embargo, a medida que se incrementa la distancia, mayor será el gasto económico de inversión en combustible, y el tiempo de recorrido, por tal, los pesos de mayor valor en la matriz (entre 7 y 10, siendo el ultimo el valor el asignado a la distancia más óptima) se han asignado entre un rango de 500 m a 2500 m de distancia.

Mapa de distancias a caminos

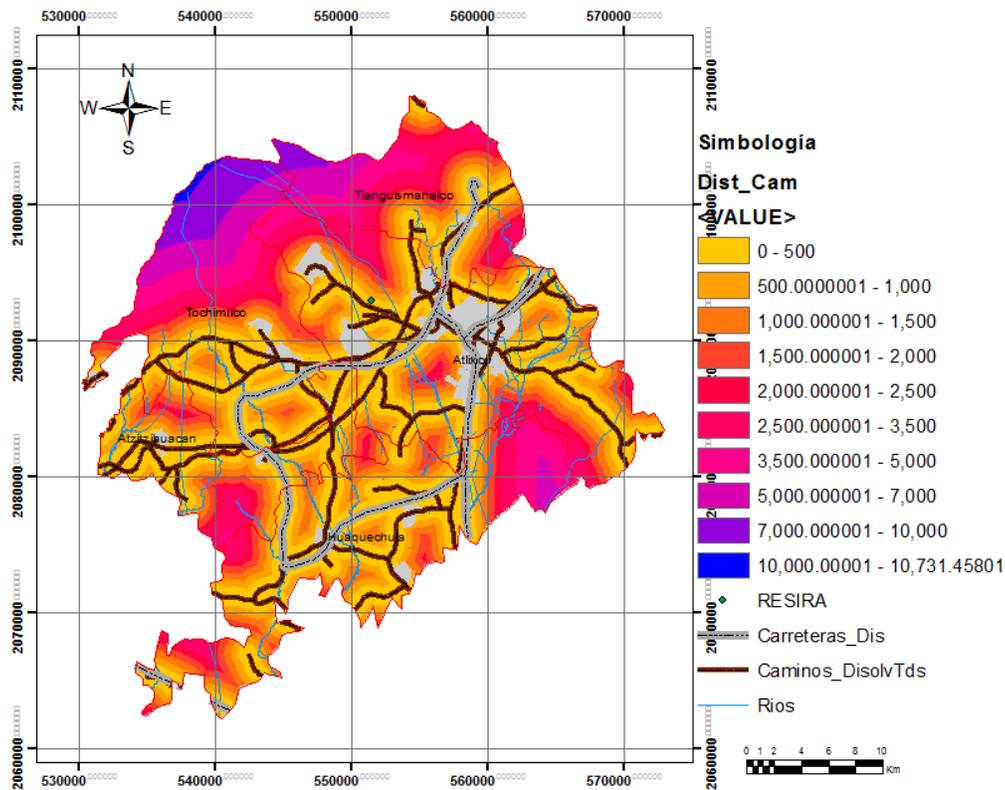


Figura 17. Mapa de distancias a las principales caminos en la sub-cuenca Nexapa (elaboración propia a partir de información de INEGI, 2016).

Simbología: RESIRA= Relleno sanitario intermunicipal de Atlixco; Carreteras_Dis= Carreteras; Caminos_DisolvTds= Caminos; Dis_Cam= Distancia a caminos.

Mapa de distancias a carreteras

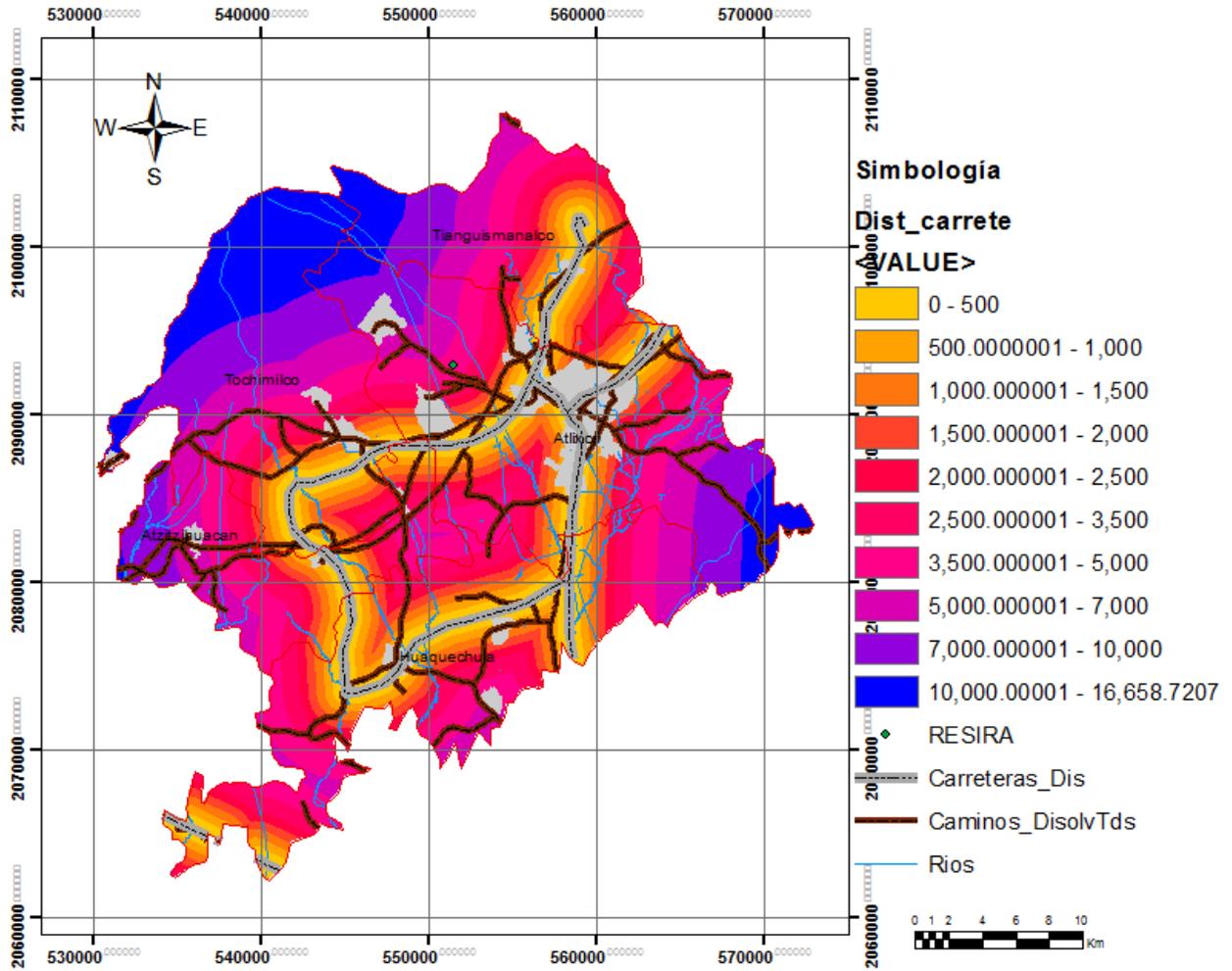


Figura 18. Mapa de distancias a las principales carreteras en la sub-cuenca Nexapa (elaboración propia a partir de información de INEGI, 2016).

Simbología: RESIRA= Relleno sanitario intermunicipal de Atlixco; Carreteras_Dis= Carreteras; Caminos_DisolvTds= Caminos; Dist_carrete= Distancias a carreteras

4.1.15 Mapa de pozos de agua

Para la construcción de la zonación distal de los puntos de extracción de pozos de agua, se usó el archivo de pozos (construido a partir de la información disponible en la REDPA-CONAGUA. 2016), considerando un diámetro estándar de 5 m en los pozos, y ya que no se cuenta con estudios, del cálculo de cono de abatimiento, se estableció un área Buffer de 500 m (zona de restricción), siendo la zona restringida entre 0 y 500 m desde el centro del pozo (Figura 19).

Mapa de distancias de pozos de agua

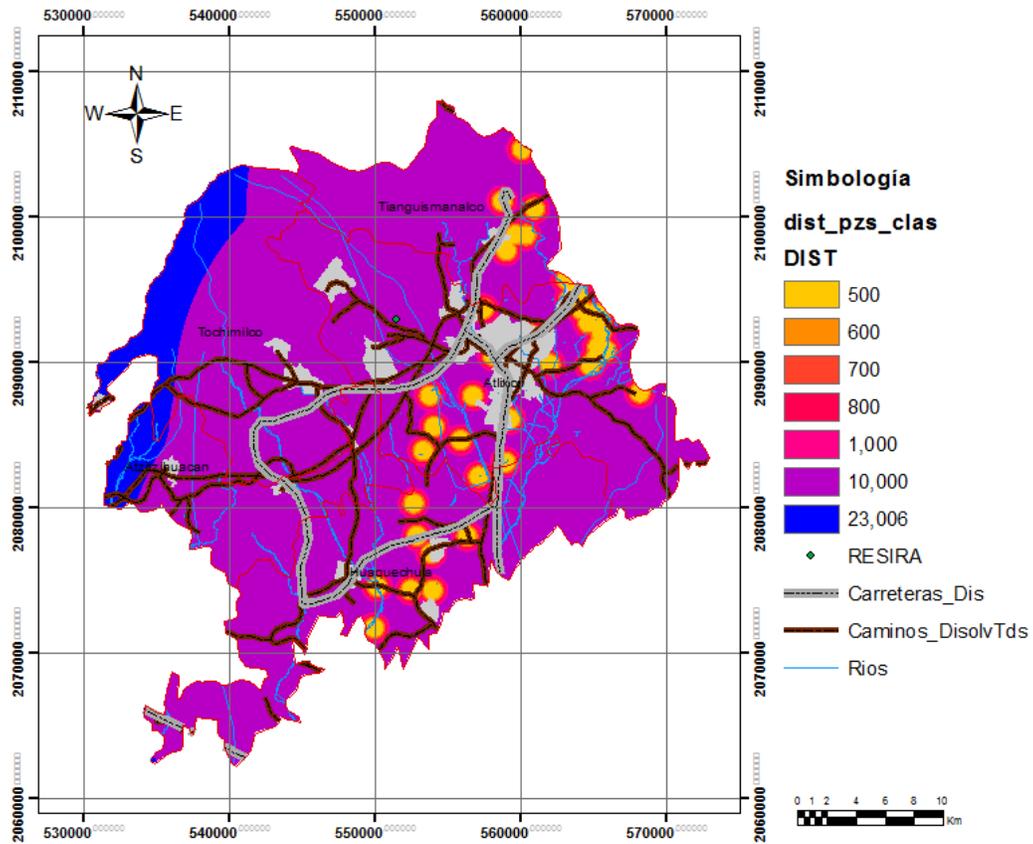


Figura 19. Mapa de distancias a pozos en la sub-cuenca Nexapa (elaboración propia a partir de información de CONAGUA, 2016).

Simbología: RESIRA= Relleno sanitario intermunicipal de Atlixco; Carreteras_Dis= Carreteras; Caminos_DisolvTds= Caminos; dist_pzs_clas= Distancias de pozos de agua.

4.1.16 Mapa de distancias de ríos

De acuerdo con la NOM-083-SEMARNAT-2003, el área de restricción (Buffer) respecto a los ríos (sin importar el caudal, si son perenes o de temporal – intermitentes) debe ser de 100 m, siguiendo la morfología del río (Figura 20). En este trabajo el rango se estableció a cada 200 m a partir de la zona Buffer (100 m de restricción) hasta los 700 m. Considerando que a partir de los 700 m, son sitios de poca o nula influencia para los ríos y por lo tanto, presenta los valores más altos del rango (es decir, corresponde a sitios óptimos de acuerdo con esta temática) en la matriz de pesos ponderados.

Mapa de distancias de ríos

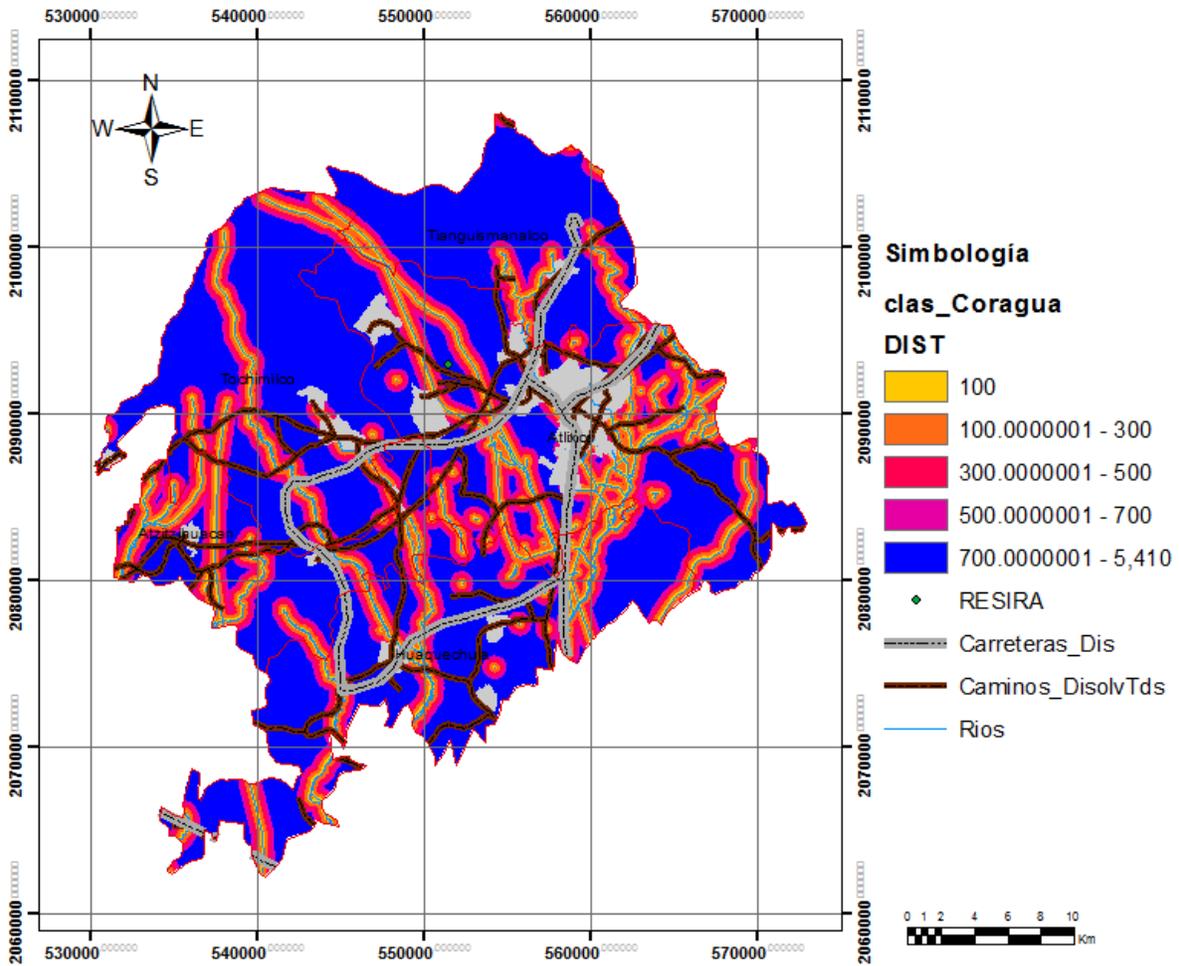


Figura 20. Mapa de distancias a ríos en la sub-cuenca Nexapa (elaboración propia a partir de información de CONABIO, 2016).

Simbología: RESIRA= Relleno sanitario intermunicipal de Atlixco; Carreteras_Dis= Carreteras; Caminos_DisolvTds= Caminos; clas_Coragua= Distancia de ríos.

4.1.17 Mapa de distancias a cuerpos de agua

La región de la sub-cuenca de Nexapa dispone de distintos cuerpos de agua (*e. g.*, manantiales) tan es su importancia que existen numerosos banearos o centros recreativos (*e. g.*, Metepec). Basado en la NOM-083-SEMARNAT-2003 el área de restricción (Buffer) a los cuerpos de agua es de 500 m, el mapa de distancias a cuerpos de agua (Figura 21) presenta una zonificación de distancias cada 200 m y cada 500 m hasta los 1500 m.

Mapa de distancias a cuerpos de agua

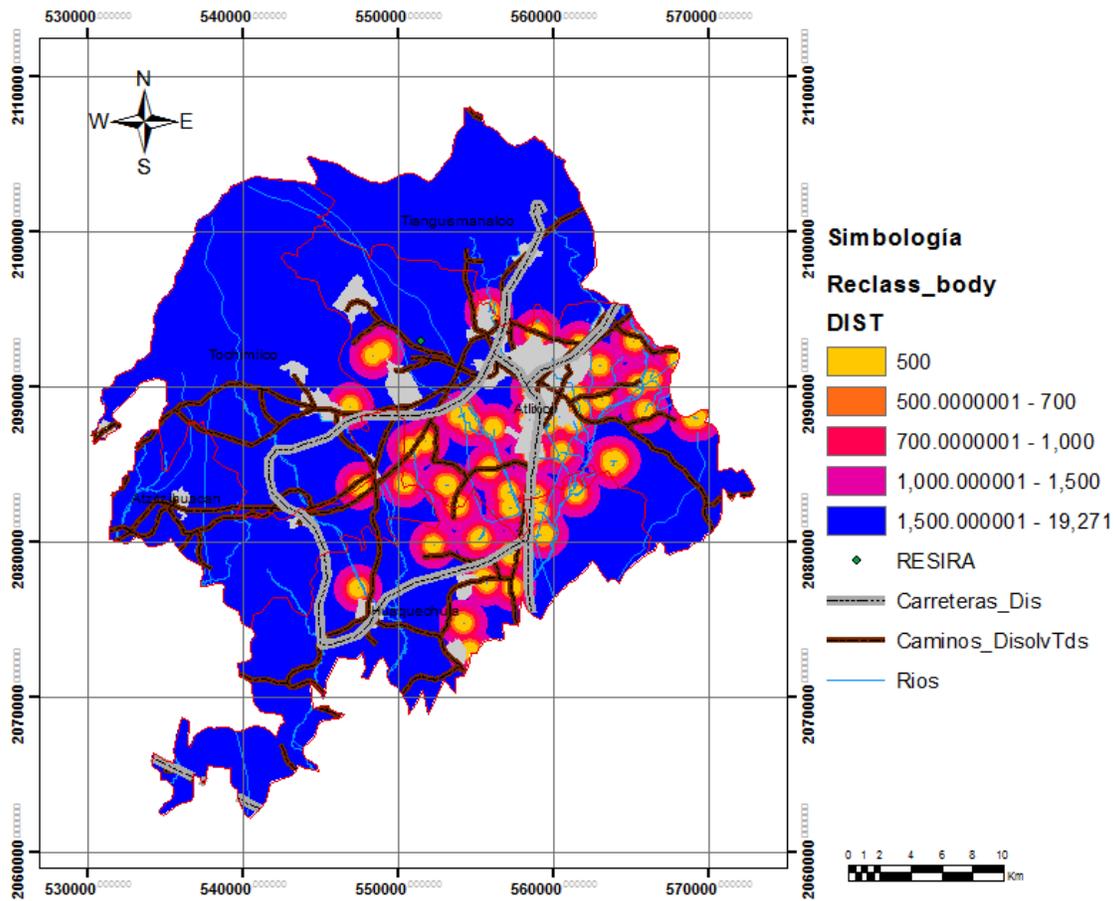


Figura 21. Mapa de distancias a principales cuerpos de agua en la sub-cuenca Nexapa (elaboración propia a partir de información de CONABIO e INEGI, 2016).

Simbología: RESIRA= Relleno sanitario intermunicipal de Atlixco; Carreteras_Dis= Carreteras; Caminos_DisolvTds= Caminos; Reclass_body= Distancia a cuerpos de agua.

4.1.18 Mapa de distancias de zonas de inundación

En el mapa de distancias de zonas de inundación (Figura 22), la zona de restricción (Buffer) comprende del área identificada (zona 0) a 500 m de su periferia. Los rangos establecidos se establecieron a cada 500 m, hasta los 2500 m de distancia, se considera que debido a la morfología del propio territorio, está la superficie espacial que debe considerarse en caso de un evento de precipitación máximo en la región.

Mapa de distancias de zonas de inundación

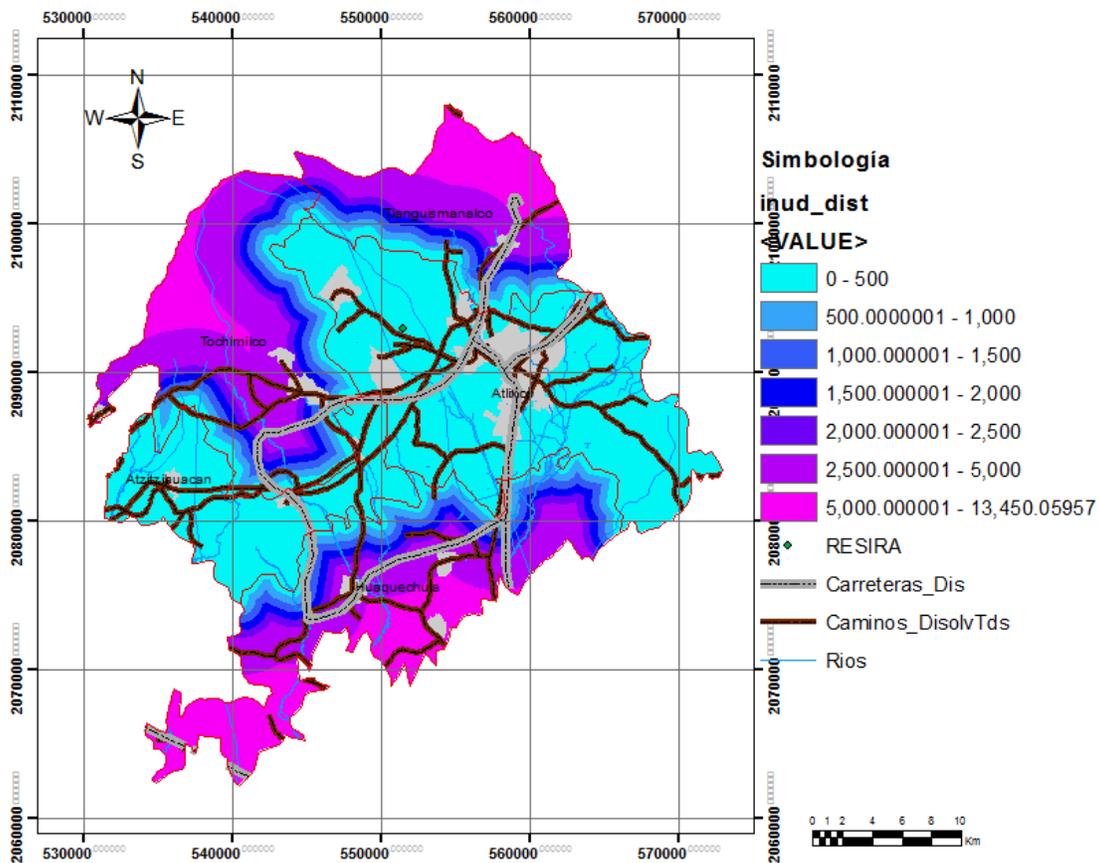


Figura 22. Mapa de distancias a principales zonas de inundación en la sub-cuenca Nexapa (elaboración propia a partir de información de CONABIO e INEGI, 2016).

Simbología: RESIRA= Relleno sanitario intermunicipal de Atlixco; Carreteras_Dis= Carreteras; Caminos_DisolvTds= Caminos; inud_dist= Distancias de zonas de inundación.

4.1.18 Mapa de distancias a zonas de falla y fractura

La evolución geotectónica de la sub-cuenca de Nexapa, ha modelado el relieve no solo con la presencia de cuerpos volcánicos, material piroclástico o derrames ígneos, también existe un conjunto de fracturas y fallas distribuidos a escala regional, estas estructuras controlan parte del modelado del relieve y la dirección de flujos de agua, en forma superficial y subterránea. El mapa de distancias a zonas de falla y fractura (Figura 23), se estableció con un rango de distancia de 500 m hasta los 2000 m, y de ahí en dos segmentos más (Figura 23). El área de restricción (zona buffer) es de los 0 a los 500 m, donde la línea 0 comienza en el perímetro de la línea de falla o fractura.

Mapa de distancias a zonas de falla y fractura

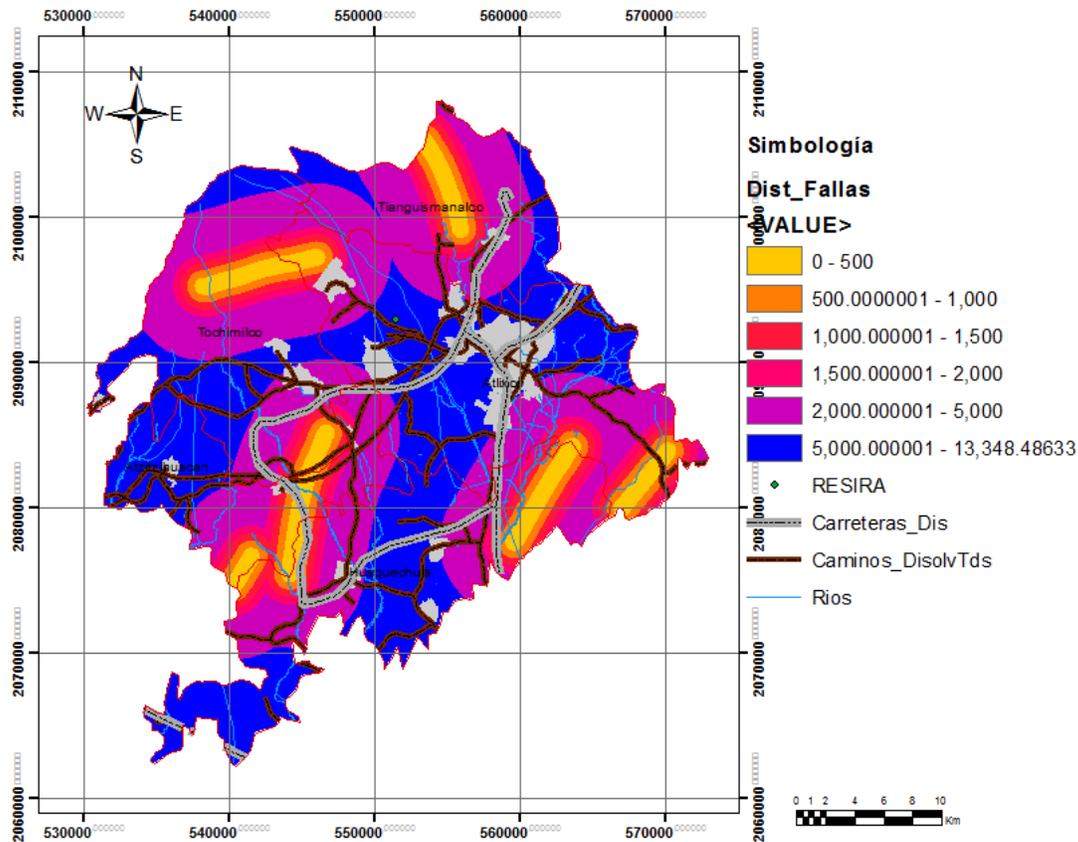


Figura 23. Mapa de distancias a fallas y fracturas en la sub-cuenca Nexapa (elaboración propia a partir de información de INEGI, 2016).

Simbología: RESIRA= Relleno sanitario intermunicipal de Atlixco; Carreteras_Dis= Carreteras; Caminos_DisolvTds= Caminos; Dist_Fallas= Distancias fallas y fracturas.

4.2.- Obtención del mapa de aptitud de SP_RSU

Como resultado del proceso del cruce de factores y restricciones, utilizando las herramientas de álgebra de mapa y superposición de las capas temáticas, se obtuvo una imagen en Raster con un intervalo entre 15.5 y 65.5, correspondiente con la configuración de la matriz de pesos ponderados, donde el valor máximo se asocia con aquellas condiciones más favorables para la exploración de establecer un relleno sanitario (Figura 24). A partir de este rango de valores, obtenidos como resultado final (mapa de aptitud) de la suma de todas las capas temáticas, se realizó la separación de intervalos en 5 clases: excelente (55.1-65.5), muy bueno (45.1-55.0), bueno (35.1-45.0), moderado (25.1-35.0), y no recomendado (15.0-25.0), siendo los valores más altos los asociados a los sitios más óptimos para la planeación del futuro confinamiento de residuos sólidos urbanos.

Mapa de variables e identificación de sitios Potenciales para la ubicación de RSU

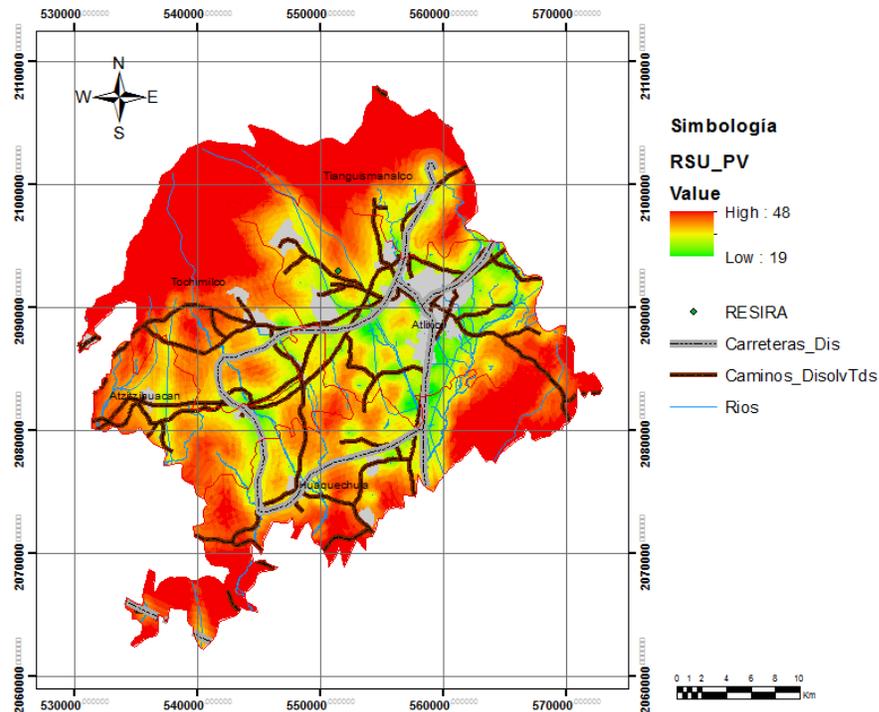


Figura 24. Mapa de evaluación por pesos ponderados para la detección de sitios potenciales para Residuos Sólidos Urbanos en la sub-cuenca Nexapa (elaboración propia a partir de información de INEGI, 2016).

Simbología: RESIRA= Relleno sanitario intermunicipal de Atlixco; Carreteras_Dis= Carreteras; Caminos_DisolvTds= Caminos; RSU_PV= variables e identificación de sitios potenciales para la ubicación de RSU.

Este mapa inicial, se volvió a reconfigurar centrándose únicamente en las primeras tres clasificaciones viables o de mayor interés, para explorar como sitios potenciales para el confinamiento futuro de residuos sólidos urbanos (SP-RSU). En el mapa de aptitud obtenido (Figura 25) se identifican solo 2 sitios con condiciones excelentes, 27 zonas consideradas como buenas (muy buenas) y 23 zonas consideradas como moderadas (buenas) para la planeación del futuro confinamiento de residuos sólidos urbanos. Como último filtro del mapa de aptitud, se sobre puso a una imagen LANDSAT 8 (del 18 de abril de 2017), donde se verifico que las zonas obtenidas no se superpusieran con alguna construcción, o vía de transporte.

Se realizaron 5 campañas de verificación de campo (Figura 26) en los sitios geolocalizados en esta investigación (Anexo 3), se generó el archivo kmz para poder utilizarse sobre Google Earth (figura 26) que sirvió como apoyo para la planeación logística durante la campaña de verificación en campo. De forma general se obtuvieron las siguientes observaciones:

a) Hay poblaciones que no superan los 100 habitantes en la región, por lo tanto estarían fuera a los criterios de la norma NOM-083SEMARNAT, generando una vulnerabilidad social a estas personas y sus actividades, ya que la norma solo contempla poblaciones superiores a 2500 habitantes.

b) Solo en uno de los sitios geolocalizados, no existe coincidencia con el mapa de aptitud obtenido de sitios potenciales, ya que en el sitio existe un campo de usos recreativos que no se encuentra en fuentes oficiales, ni se observa claramente en la imagen de satélite LANDSAT 8, el sitio es cercano al municipio de Axocopan.

c) Las zonas detectadas como potenciales, son aptas para estudios de sitio para el establecimiento de futuros rellenos sanitarios. Sin embargo, se requiere de un estudio de optimización y de sitio para determinar la viabilidad del mismo y el tipo de relleno a establecer (A, B, C o D).

d) En los sitios geolocalizados en el mapa de aptitud, las condiciones del terreno son favorables, ya que inclusive en algunas zonas, actualmente ya existen algunos socavones para la extracción de bancos de material.

e) A pesar de que la zona estudiada se encuentra cerca al volcán Popocatepetl, superficialmente en los sitios verificados no se compromete ningún río o cuerpo de agua, no obstante se recomienda realizar un estudio de carácter regional hidrogeológico de sitio.

f) Hay que aclarar, que para lograr un filtrado más fino de este mapa de aptitud de sitios potenciales para residuos sólidos urbanos (SP-RSU), es necesario contar con imágenes de satélite de mayor definición, con tamaño de pixel de ≤ 5 m, que permitan detectar aun las viviendas o construcciones más aisladas, o bien oficialmente no registradas, así como rasgos más detallados del territorio.

Mapa de aptitud de Sitios Potenciales de Residuos Sólidos Urbanos (SP-RSU).

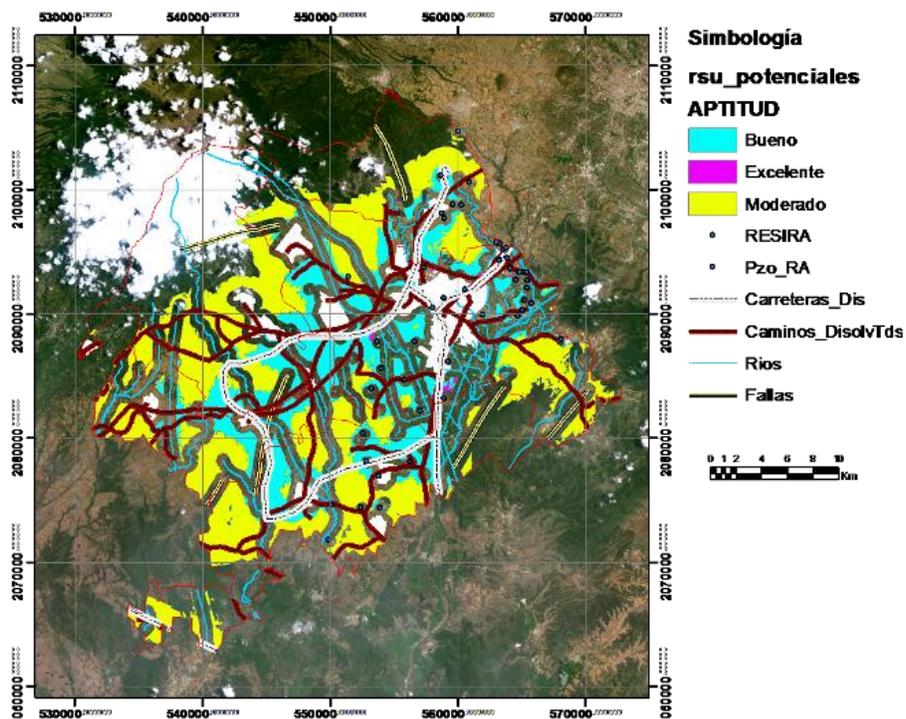


Figura 25. Mapa de aptitud obtenido, de sitios potenciales para residuos sólidos urbanos (SP-RSU), superpuesto a imagen LANDSAT 8 (imagen de marzo de 2017). *Simbología:* RESIRA= Relleno sanitario intermunicipal de Atlixco; Pzo_RA= Pozos de la región; Carreteras_Dis= Carreteras; Caminos_Disolv Tds= Caminos; rsu_potenciales= sitios geolocalizados potenciales.

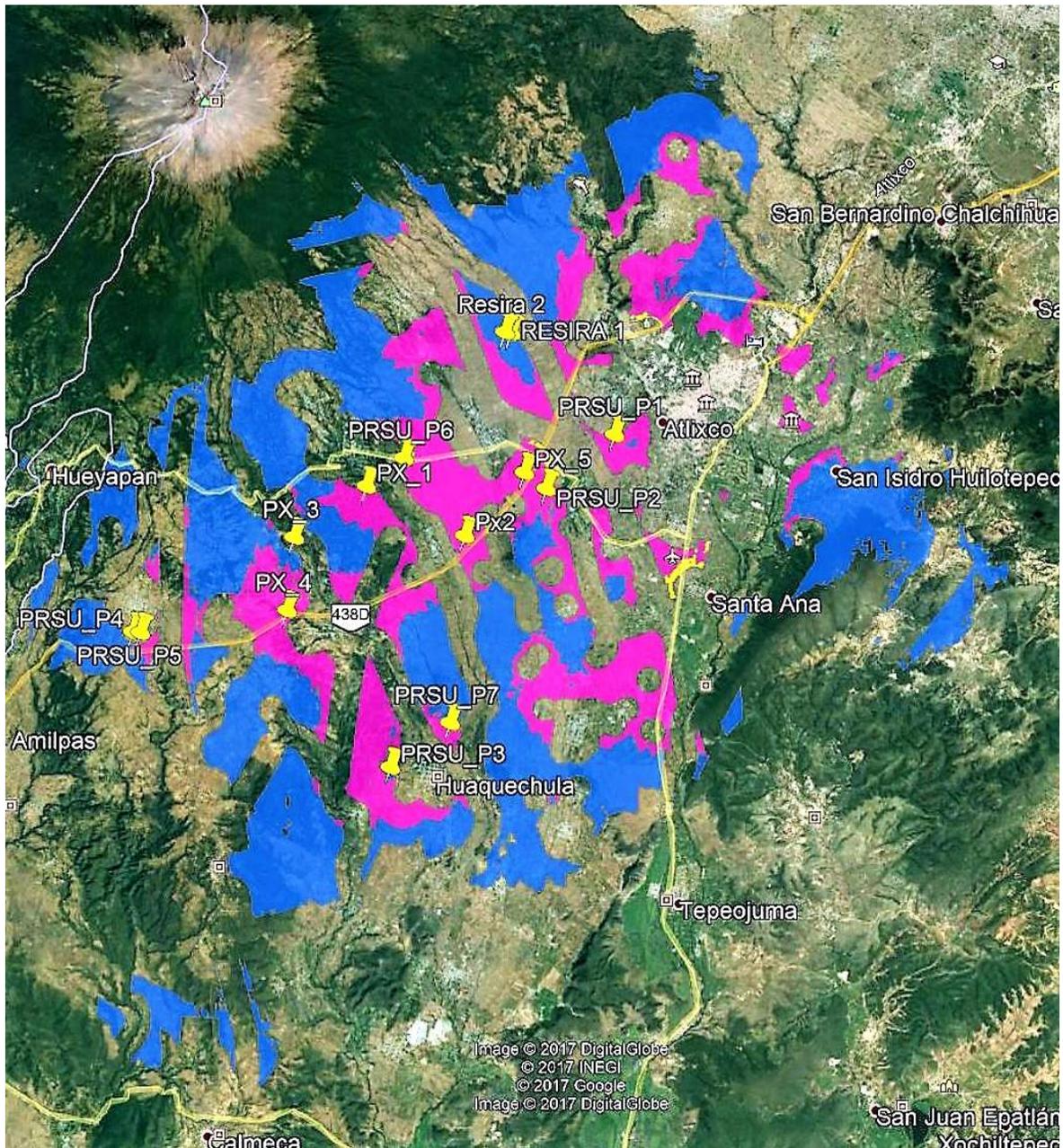


Figura 26. Mapa de aptitud obtenido, de Sitios Potenciales para Residuos Sólidos Urbanos (SP-RSU), En formato KMZ. Las pijas en amarillo, representan los sitios verificados en campo.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

- Se generó un mapa de aptitud para la geolocalización de sitios potenciales para la disposición final de Residuos Sólidos Urbanos en la sub-cuenca Nexapa, Puebla, utilizando las técnicas de Análisis Multivariante y Análisis Multicriterio (EMC) de forma combinada, considerando los criterios de la norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003.
- Se puede concluir de los resultados obtenidos en esta investigación, que la correcta aplicación de la norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003 a partir de la evaluación de la matriz de pesos ponderados permite detectar en forma fehaciente, la selección de polígonos bien definidos (mapa de aptitud) de carácter regional, para realizar las campañas de evaluación de sitio, para establecer un Relleno Sanitario.
- Debido a que la evaluación requirió del análisis de distintas capas temáticas, la estandarización del tamaño de unidad celda y resolución de pixel en el ambiente de trabajo es crucial (para este caso fue de 120 m y 30 m, respectivamente). No obstante hay que resaltar que el tamaño del pixel y la unidad celda de trabajo, depende de distintos factores (según sea el caso de estudio), pero en especial de el tamaño de resolución del archivo original, la cantidad de archivos que maneja en forma simultánea el sistema, la dimensión del área de trabajo y por ende del peso en bytes de los archivos.
- La actual tendencia de crecimiento en la población y la continua expansión de las manchas urbanas, hacen indispensable a los tomadores de decisiones y cuerpos académicos de investigación, emprender acciones sistemáticas de forma conjunta sobre el territorio, su uso y el cambio de su uso para distintos fines antropogénicos, el manejo sustentable del medio ambiente, la seguridad alimentaria e hídrica, que garantice las satisfacción de las actuales demandas sociales pero sin comprometer a las generaciones futuras.

- A partir de los resultados obtenidos en esta investigación, soportado con las campañas de verificación de campo (*in-situ*), se puede afirmar que la aplicación del método multicriterio soportado con las herramientas que brindan los sistemas de información geográfica, son herramientas confiables para aportar información crucial a la solución de distintos problemas territoriales, que requiere del análisis de los distintos actores y su interacción con el medio ambiente, como en este caso con la disposición final y el manejo de los Residuos Sólidos Urbanos.
- Para la región específica de la sub-cuenca de Nexapa, podemos concluir que los resultados obtenidos en el mapa de aptitud, para la localización de sitios potenciales para la disposición final de Residuos Sólidos Urbanos, no busca encontrar sitios que utópicos, sino busca la evaluación del territorio para detectar dentro de estas unidades de análisis el sitio más apto o bien el menos malo. Sin embargo, es necesario aclarar que este tipo de estudios de carácter regional no exime a cumplir con la ejecución de los estudios de sitio dispuestos en la norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003, sino más bien generar información puntual sobre los sitios potenciales donde deben centrarse los esfuerzos, para optimizar costos económicos, evitar daños ambientales y daños a la salud humana.
- El mapa de aptitud desarrollado es una valiosa información que permite planificar mejor la autorización del cambio del uso del suelo. Si bien, un territorio puede parecer muy amplio no necesariamente toda la región satisface una necesidad, en este caso la confinación de Residuos Sólidos Urbanos, sin comprometer otras demandas sociales y la sustentabilidad ambiental.
- La geolocalización de los sitios potenciales que se presentan en el mapa de aptitud, es necesaria para el desarrollo estratégico del manejo y planeación de un territorio, pero también para generar una política pública incluyente en todas las dimensiones sociales. Si bien desde el punto de vista clásico de la ingeniería, que es dar la solución a un problema, muchas ocasiones al establecer un proyecto sin el adecuado

análisis territorial y social, como un relleno sanitario, puede desencadenar severos problemas sociales.

- Ya que la mayor parte de los criterios adoptados en esta investigación, fueron tomados de la vigente NOM-083-SEMARNAT-2003, inicialmente muchos de los sitios detectados como potenciales, estaban muy cerca de poblaciones pequeñas o bien las incluía, lo cual puede llevar a generar incertidumbre, al momento de que sitio puede ser adecuado o no. Esto motivo al uso de imágenes de satélite LANDSAT 8, para que se pudieran filtrar estos polígonos encontrados en una primera etapa, antes de iniciar la campaña de verificación. Sin embargo, hay que aclarar que se requiere de imágenes de mayor resolución (*e. g.* QuickBird, EVISMAR) con tamaño de pixel ≤ 3 m., para poder tener un mapa de aptitud aun más fino, que evite en medida de lo posible la inclusión de viviendas o pequeñas comunidades.
- Finalmente, se puede concluir que con lo abarcado en esta investigación, se obtuvieron en el mapa de aptitud los sitios candidatos de carácter regional viables a considerar para los estudios de sitio y de análisis territorial, el propio RESIRA del municipio de Atlixco converge con los resultados obtenidos. Hay que señalar que aun falta analizar el mapa de aptitud obtenido en función de la cantidad de población y producción de Residuos Sólidos Urbanos para identificar qué tipo de relleno sanitario se requiere (A, B, C o D), o bien una combinación de ellos dentro de la región.

5.2 Recomendaciones

Con lo detectado durante la primera evaluación, considerando como base los factores y restricciones de la vigente norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003, se recomienda:

- ❖ Implementar la metodología seguida en esta investigación, para una primera etapa de análisis regional, que permitiría tener una visión espacial de los sitios que son viables para la evaluación de la disposición final de residuos sólidos urbanos, evitando así el cambio del uso del suelo sin considerar el futuro confinamiento de los residuos y disminuyendo el riesgo al medio ambiente.
- ❖ Hacer un estudio complementario a esta investigación, que permita a partir del mapa de aptitud, detectar cuantos rellenos sanitarios serian óptimos implementar en la región y de qué tipo, para garantizar un adecuado servicio a los usuarios actuales, pero también a la creciente y futura demanda.
- ❖ Una vez se tengan ambos estudios, discutir las posibles alianzas estratégicas para la construcción de rellenos intermunicipales, si es necesario.
- ❖ Con lo observado en la sub-cuenca de Nexapa durante las campañas de verificación, en las distintas comunidades rurales visitadas, se recomienda sobre la vigente norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003, reevaluar los siguientes criterios: a) restricción de la cantidad de la población (debería pasar de 2500 habitantes a 100 habitantes), b) zonas de recarga y cono de abatimiento a zonas de recarga eficiente a partir del criterio de unidades hidrológicas de respuesta (HRUs) y zonas de captación, y c) incorporar de forma más detallada conocimiento de la dinámica hidrogeológicas de la región.
- ❖ Para conocer ha detalle las propiedades hidrogeológicas en los sitios de interés, se recomienda implementar un estudio de sondeos eléctricos verticales (SEVs) con al menos 30 m de penetración, o tomografías eléctricas con una profundidad de ~7 m o mayor de ser posible. ya que el agua es un recurso vital y en muchos casos no está a disposición de todos, pero que puede quedar comprometido por la contaminación de lixiviados producidos en rellenos sanitarios, sitios controlados y sitios no controlados.

6. Bibliografía

Alfonso Romero Marisol. 2016. Selección De Sitios Intermunicipales Para Rellenos Sanitarios Mediante Un Modelo De Soporte De Decisiones Espaciales. Programa Único De Especializaciones De Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma De México. 63 pp.

Barradas Rebolledo Alejandro. 2009. Gestión Integral De Residuos Sólidos Municipales. Universidad Politécnica De Madrid. 103 pp.

Buenrostro Delgado Otoniel, Mendoza Manuel Y López Granados Erna. 2005. México Análisis Comparativo De Tres Modelos De Soporte De Decisiones Espaciales En La Selección De Sitios Para Rellenos Sanitarios En La Cuenca Del Lago De Cutzeo, México. 2005 investigaciones Geográficas, Boletín 57.

Cca (2015). Directrices Para La Estimación De Las Emisiones De Carbono Negro De América Del Norte. Métodos Recomendados. Comisiones Para La Cooperación Ambiental. Montreal. 105 pp.

Church L. R 2002 Geographical Information Systems And Location Science. Computers & Operations Research 29., 541-562.

Church L. R Location Modelling And Gis. 137 pp.

COESPO. (2011). Perfil Socio-Demográfico del Municipio de Atlixco. Puebla: Gobierno del Estado. 15 pp.

Conesa García Camelo. 1996. Áreas De Aplicación Medioambiental De Los 'SIG'. Modelaciones Y Avances Recientes. Dpto. De Geografía Física, Humana Y Análisis Geográfico Regional. Facultad De Letras. Universidad De Murcia. Apdo. 4021 – 30080.

Ibáñez Asensio Sara. Gisbert Blanquer Juan Manuel. Moreno Ramón Héctor. El Sistema de Coordenadas UTM. Escuela Técnica Superior De Ingeniería Agronómica Y Del Medio Natural. Universidad Autónoma De Valencia. 60 pp.

Cusco Tenesaca Jorge William. Picón Aguirre Kristoffer Efraín. 2015. Optimización De Rutas de Recolección de Desechos Sólidos Domiciliarios Mediante uso de Herramientas

Sig. Facultad de Ciencias Químicas Escuela de Ingeniería Ambiental. Universidad de Cuenca. 45 pp.

Gutiérrez Avedoy Víctor. 2006. Diagnostico Básico Para La Gestión Integral De Residuos. Secretaria De Medio Ambiente Y Recursos Naturales (SEMARNAT).

Badilla Elena. Rojas Wilfredo & Vargas Ingrid. 2007. Ubicación De Sitios Aptos Para La Disposición De desechos Sólidos Al Oeste Del Valle Central, Costa Rica. Escuela Centroamericana De Geología. Universidad De Costa Rica. 72 pp.

Bautista Andalón Maximiano. Rosales Contreras Claudia Elizabeth. Contreras Sigala Elie Livier. Guía Para La Selección De Sitios Potenciales Para La Ubicación De Rellenos Sanitarios Por El Método De Peso Y Escala Con El Uso De Algebra De Mapas. Coordinación De Planeación Y Evaluación. Iitej. 27 pp.

Fernández, I. 2009. Las coordenadas geográficas y las proyecciones cartográficas UTM. Consultado 28 jun. Disponible en <http://www.cartografia.projections/index.php>

Flores Salazar Jorge Arturo. 2013. Identificación De Sitios Potenciales Para La Disposición Final De Residuos Sólidos En Los Municipios Atlacomulco, Ixtlahuaca Y Jocotitlán, Estado De México. Universidad Autónoma Del Estado De México Facultad De Geografía. 110 pp.

Galindo Valencia Oscar Mauricio. 2009. Diseño Del Relleno Sanitario Intermunicipal Para Los Municipios De Átoyac De Álvarez-Benito Juárez Y Técpan. Universidad Nacional Autónoma de México. 39 pp.

Giménez Vera Mariela. Cardazo Carrera Carlos Ricardo. 2012, Localización Óptima De Relleno Sanitario Aplicando Técnicas Multicriterio En Sistemas De Información Geográfica (SIG) En El Área Metropolitana Del Alto Paraná. 7 mo Congreso De Medio Ambiente. Universidad Nacional Del Este. 8 pp.

Gómez, M; Barredo, JI. 2005. Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio. 2 ed. Madrid, ES, RA –MA Editorial. 258 p.

González Rojas María Fernanda. Minga León Fadia Elizabeth. 2010. Definición De Sitios Para El Tratamiento Y Disposición final De Residuos Sólidos En Cinco Parroquias Rurales del Cantón Loja, Utilizando Sistemas De Información geográfica (SIG). Universidad Nacional De Loja Ecuador.

Guan Dongile, Gao Weijun, Su Weici. Li Haifeng. Hokao Kazunori. 2010. Modeling and Dynamic Assessment of Urban Economy-Resource-Environment System with a Coupled System Dynamics-Geographic Information System Model.

Guía De Cumplimiento de la Nom-083-SEMARNAT-2003.

Guía para La elaboración de programas Municipales para la prevención y gestión integral de los residuos sólidos urbanos. 2010. 40 pp.

Guía Para la Implementación, Operación y Cierre de Rellenos Sanitarios. Viceministerio de Agua Potable y Saneamiento Básico Dirección General de Gestión Integral de Residuos Sólidos. 2010.

Herrera Becerra Nina María. 2014. Identificación De Áreas Potenciales Para El Manejo De Residuos O Desechos Peligrosos En El Departamento De Dinamarca. Universidad Nacional De Colombia.

INE 2013 La Situación De Los Residuos Sólidos En México. Cronología Histórica (en línea) México disponible en

<http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/345/sresiduos.html> consultado el 13 de abril de 2017

INEGI. (2010). PANORAMA SOCIO DEMOGRAFICO DE PUEBLA TOMO I. <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM21puebla/municipios/21019a.html> consultado el 22 de noviembre de 2016

Jaramillo, J. 1991. Guía para el diseño, construcción y operación de Rellenos sanitarios manuales. Serie técnica N° 28. Washington DC.214 pp.

J. Bunch Martin. Kumaran T. Vasantha. Joseph R. 2012. Using Geographic Information Systems (GIS) For Spatial Planning and Environmental Management in India: Critical Considerations. International Journal of Applied Science and Technology.

Mancebo Quintana. S. Ortega Perez, E. Valentin Criado. A.C. Martin Ramos B. Martin Fernández. L. 2008. Libro SIG. Aprendiendo A Manejar Los SIG En La Gestión Ambiental. Madrid. España. Los Autores.

Mancheno, J. 1997. Estudio de costos beneficio del relleno sanitario de la Escuela Agrícola Panamericana. Folleto. Escuela Agrícola Panamericana.23pp.

Maximiliano Gascón Sergio. Marcela Jiménez Lina. Pérez Helena. 2015. Optima Ubicación De Un Relleno Sanitario Para El Área Metropolitana Del Valle De Aburra Empleando Sistema De Información Geográfica. Ing. Usbmed. Vol. 6. No 1.

Mena Frau Carlos. Morales Hernández Yohana. Ormazábal Rojas Yony. 2010. Localización De Un Relleno Sanitario En La Comuna Deparral, Chile, A Través De Evaluación Multicriterio. Interciencia Sep. 2010, Vol. 35. No. 9.

Miranda Coss Ma. De Lourdes. 2011. Aplicación De Métodos Geofísicos En La determinación de Lentas de Biogás En Un Relleno Sanitario, Caso de Aplicación Bordo Poniente. Universidad Nacional Autónoma De México.

Norma Oficial Mexicana Nom-083-Semarnat-2003. Especificaciones De Protecciones Ambiental Para La Selección De Sitios, Diseño, Construcción, Operación, Monitoreo, Clausura, Y Obras Complementarias De Un Sitio De Disposición Final De Residuos Sólidos Urbano Y De Manejo Especial. Diario Oficial De La Federación.

Ortega Zuñiga Jorge Enrique. 1994. Construcción Y Operación De Sitios Controlados De Disposición final De Residuos Sólidos (Relleno Sanitario) Instituto Tecnológico Dela Construcción, A. C. 27 pp.

Paz Santos Audato. 2011. Localización De Sitios Adecuados Para Establecer Un Vertedero de Residuos Sólidos Urbanos En El Municipio Del Distrito Central De Honduras. Universidad Nacional Autónoma De Honduras. Facultad De Ciencias Espaciales.

Quiñones Ferdinand, Beale Carlos. Utilización De Un Sistema De Información Geográfico (SIG) Para La Ubicación De Un Relleno Sanitario Regional En Puerto Rico.

Ramírez Sánchez Gabriela. 2011. Estudio De La Viabilidad De Un Sitio En El Municipio De Ayahualulco Veracruz Para Diseñar Un Relleno Sanitario Intermunicipal. Instituto Politécnico Nacional.

Rittenhouse Navarrete Alln Neptali. 2003. Caracterización Física De Sitios Potenciales Para La Ubicación Del Relleno Sanitario De Zamorano. Carrera De Desarrollo Socioeconómico Y Ambiente.

Rodríguez Salinas Marcos Arturo. Rebollar Platas Minerva. 2006. Selección Primaria De Zonas Para La Construcción De Sitios De Disposición Final De Residuos Sólidos Urbanos Y De Manejo Especial Caso De Estudio: Municipio Del Estado De México. Revista Aidis De Ingeniera Y Ciencias Ambientales, Investigación, Desarrollo, Y Práctica. Volumen 1 Numero 1.

Rodriguez, J. 1992. Manual para manejo de desechos sólidos municipales. [Informe]. Tegucigalpa, Honduras. OPS/OMS. *s.p.*

Roe Sosa Adriana. Rojas Valencia Neftali. Torres Romero Crisoforo. 2014. Localización De Un Sitio Para construir Un Centro De aprovechamiento De Residuos Sólidos urbanos A Través De Tres Métodos. Revista Aidis De Ingeniera Y Ciencias Ambientales: Investigación, Desarrollo Y Practica .Vol. 7. No 2. 141-153.

Sánchez Olgún Gabriela. 2007. Gestión Integral De Residuos Sólidos Urbanos De Los Municipios De Actopan, San Salvador Y El Arenal Del Estado De Hidalgo. Universidad Autónoma Del Estado De Hidalgo. Instituto De Ciencias Básicas e Ingeniera. Centro De Investigaciones Químicas.

Sánchez Núñez Juan Manuel. Velázquez Serna Jessica. Serrano Flores Ma. Elena. Ramírez Treviño Alfredo. Balcázar Vázquez Alejandro. Quintero Rodríguez Raúl. 2008. Criterios Ambientales Y Geológicos Básicos Para La Propuesta de un Relleno Sanitario en Zinapecuaro, Michoacán, México. Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana. Volumen 61. No 3. 305-324.

SEMARNAT. 2009. Manual de Especificaciones Técnicas Para la Construcción de Rellenos Sanitarios Para Residuos Sólidos Urbanos (RSU) Y Residuos de Manejo Especial (RME).

Silva Teodoro J. Estrada Francisco. Ochoa Salvador. Cruz Gustavo. 2006. Propuesta Metodológica Para La Ubicación De Áreas De Disposición De Residuos Sólidos Urbanos. Centro Interdisciplinario De Investigación Para El Desarrollo Integral Regional, Ciidir-IPN Michoacán México.

Tejeda Cota Daniela. Manejo De Residuos Sólidos Urbanos En La Ciudad De La Paz. B. C. S. Estrategia Para Su Gestión Y Recomendación Para El Desarrollo Sustentable. Centro De Investigaciones Biológicas Del Norte, S.C.

Tobón Avalos Adriana. 2013. Caracterización del biogás producido en el relleno sanitario intermunicipal de Atlixco (RESIRA) y estimación de la factibilidad técnica y económica para su aprovechamiento. Tesis de Maestría en Ingeniería Química. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. 131 pp.

Trajo, R. 1994. Procesamiento de la basura urbana. Ed. Trillas. Barcelona, España. 283p.

Valencia Londoño Diana Elizabeth. Arias Muños Carolina. Vanegas Ospino Enrique. 2010. Metodología Para La Localización De Un Parque De Tratamiento Y Disposición Final De Residuos Sólidos De Tipo Regional Desde Una Perspectiva Multidimensional. Revista Ingenieras Universidad De Medellín, Vol. 9. No 17. 63-74.

Vicente, J. 2008. Consulta, edición y análisis espacial con ArcGis 9.3. Consultado 29 jun. Disponible en <http://www.ArcCatalog> y [ArcMap.org](http://www.ArcMap.org)

Zafra Mejía Carlos Alfonso. Mendoza Castañeda Franklin Andrés. Montoya Varela Paula Alejandra. 2012. Metodología Para La Localización De Rellenos Sanitarios Mediante Sistemas De Información Geográfica. Un Caso Regional Colombiano. Revista Ingeniera E Investigación Vol. 32 No 1.

2010. Propuesta Metodológica para la selección de sitios potenciales para la ubicación de rellenos sanitarios por el método de peso y escala con el uso de álgebra de mapas. Breviario sobre prevención y gestión integral de residuos, Primera edición, 79-94

7. Anexos

Anexo 1. Generación de capas temáticas con ArcGIS 10.1

Se tomo como punto de partida, el identificar las variables de la Norma Oficial Mexicana 083-SEMARNAT-2003, considerando los factores propuestos. La información de las distintas temáticas, fue tomada de tres fuentes principales: INEGI, SEMARNAT (área de geomántica), y CONABIO. El tratamiento de esta información, se explica a continuación:

1. La información obtenida se encontraba ya en formato shapefile (*.shp).
2. Con el uso del programa ArcGIS, se importaron las capas y se analizaron las bases de datos contenidas.
3. El tamaño de pixel del ambiente de trabajo se estandarizo en 30 m., para todas las temáticas.
4. Se tomo la clasificación oficial de sub-cuencas de la CONAGUA, de ahí se reconocieron los municipios que componen la sub-cuenca de Nexapa, Puebla, en la porción alta que actualmente atiende el RESIRA.
5. Una vez obtenida la región (sub-cuenca de Nexapa), con la herramienta Clip, en ArcMap, se procedió a recortar cada uno de los shapes a la región de nuestro estudio. Solo se requirió realizar la extracción por mascara en el modelo digital de elevaciones (MDI; INEGI, 2017).

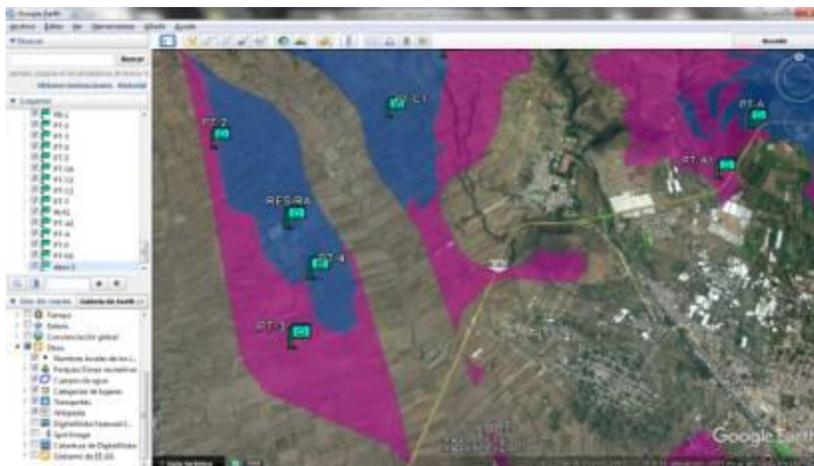
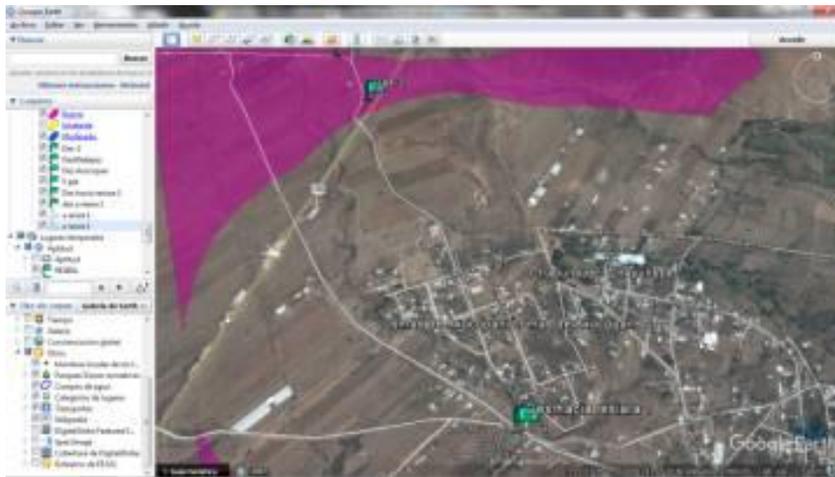
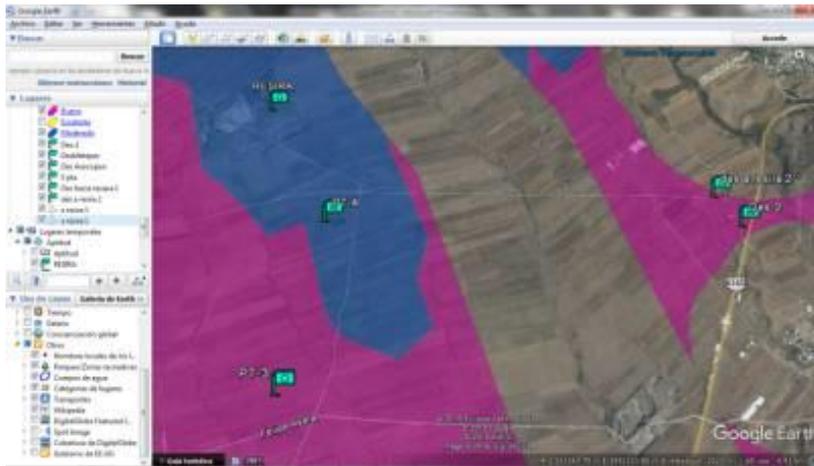
6. Ya recortadas las distintas temáticas se procedió a desplegar la información contenida: Tabla de Contenidos / click derecho sobre la capa/ propiedades/ simbología.
7. En el caso de la capa de uso de suelo, se realizó una reclasificación a la carta original, pasando de 17 clases a solo 6 (ArcToolbox/ Análisis espacial/ reclasificar). Ya reclasificado fue necesario aplicar la herramienta Dissolve, para facilitar el procesamiento y conjuntar las nuevas clases.
8. A partir del modelo digital de elevaciones (MDI) se obtuvieron las curvas de nivel de la región (ArcToolBox/ análisis espacial/ superficie/ contornos) y el mapa de pendientes.
9. A cada una de las tablas de factores (base de datos), se le agregó una nueva columna con el nombre Pp (pesos ponderados), donde se asignó el valor correspondiente de la matriz de peso ponderado, según el caso.
10. Finalmente, cada capa shapefile se transformó a formato Raster para poder ser sumada por el método de álgebra de mapas y superposición con las zonas de restricciones una vez segmentadas.

Anexo 2. Generación de capas temáticas de restricción (zonas Buffer) con ArcGIS

La construcción de las denominadas zonas Buffer, son las zonas asociadas en cada una de las capas temáticas, consideradas como zonas de restricción a partir de las recomendaciones de la Norma Oficial Mexicana 083-SEMARNAT-2003. A continuación se explican los pasos a seguir para su elaboración con el software ArcGIS:

- 1) Partiendo de que en la tabla de contenidos tenemos ya cargadas las capas temáticas a las que se quiere implementar la zona buffer (restricción en este caso) y que conocemos los valores de la restricción vamos a ArcToolbox/ herramientas de análisis/ Proximidad/ Buffer.
- 2) Se abre una ventana, en ella hay que cargar la capa a la que se aplicara el Buffer (input).
- 3) Se asigna el nombre y dirección del archivo que se creara de salida (output).
- 4) En la casilla valor de la distancia, escribimos el valor en número de la dimensión de la restricción. Al costado izquierdo aparece un list desplegable para elegir las unidades (*e. g.*, metros, kilómetros).
- 5) Para crear el archivo Buffer solo damos O.K., ya no cambiamos ningún otro parámetro. La capa generada como Buffer sobre la temática elegida permite realizar recorte o extracciones sobre otras capas temáticas, o bien generar análisis sin considerar esta zona restringida.

Anexo 3. Verificaciones de campo





Fotografías del municipio de Atzizihuacan, Puebla.



Fotografías del municipio de Tochimisolco, Puebla.



Fotografías del municipio de Tochimilco, Puebla.



Fotografía del municipio de Tochimilco, Puebla.



Fotografías del municipio de San Pedro Benito Juárez,, Puebla.



Fotografías del municipio de San Pedro Benito Juárez,, Puebla.



Fotografías del municipio de Axocopan-Atlixco, Puebla.



Fotografía del municipio de Atlixco, Puebla.



Fotografías entre los municipios de San Juan Ocotepc y Atlimeyaya, Puebla.



Fotografía entre los municipios de San Juan Ocotepc y Atlimeyaya, Puebla. Drone utilizado para la verificación espacial *in-situ*.



Fotografías en municipio de Atlimeyaya, Puebla.



Fotografías en municipio de Atlimeyaya, Puebla.



Fotografías del Réyenos Sanitario RESIRA en Atlixco, Puebla.