



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE INGENIERÍA

Colegio de Geofísica

Evaluación del impacto ambiental asociado a residuos sólidos mediante técnicas de percepción remota en la ciudad de Puebla

TESIS

Para obtener el título de:

Licenciado en Ingeniería Geofísica

Presenta:

Sergio Armando García Cruzado

Director de Tesis interno:

Mtra. Daniela Delgado Ayala

Director de Tesis externo:

Dra. Nelly Ramírez Serrato

Puebla, Pue. Noviembre 2021

Dedicatoria:

A la memoria de mi abuela Adela Flores Medina, por todos los momentos de alegría que viví junto a ti y por todo lo bueno que hiciste en mi vida. Fuiste mi mejor amiga y consejera cuando más lo necesite. Hoy ya no estas con nosotros, pero siempre estarás en mi corazón.

A mi madre Emma Cruzado Flores, por todo tu amor, apoyo y confianza que me has dado. Eres mi más grande ejemplo y el motivo para esforzarme todos los días. Gracias por todo lo que has hecho en mi vida, te quiero con todo mi corazón.

A mi padre Sergio García Palacios, por todo tu amor y por enseñarme a seguir luchando por lo que creo y quiero. Eres un gran ejemplo para mí y te quiero con todo mi corazón.

A mis hermanas Paulina y Gabriela, por todos los momentos de alegría y de apoyo que me han dado en los momentos difíciles. Las quiero y siempre estaré para ustedes.

Y, a mi sobrinito Isra, a quien quiero mucho y espero ser para él, un buen ejemplo y apoyo en su vida.

Agradecimientos

A Dios, por siempre cuidar a mi familia, por ayudarme a crecer personalmente y por siempre estar a mi lado.

A mi familia, por todo su amor y esfuerzo. Los admiro y quiero con todo mi corazón.

A mi directora externa de tesis, la Dra. Nelly Ramírez Serrato, quien me brindo la oportunidad, confianza y apoyo para terminar este trabajo. Las palabras me quedan cortas para expresarle todo el aprecio, admiración y agradecimiento que tengo hacia usted. De verdad, muchas gracias por todo, sin su guía y todo su apoyo esto no hubiera sido posible.

A mi directora interna de tesis, la Mtra. Daniela Delgado Ayala, por haber aceptado ayudarme con este trabajo y darme la confianza suficiente de seguir adelante. Sus consejos y tiempo siempre se lo agradeceré.

A la BUAP, por darme las experiencias más enriquecedoras de mi vida, tanto académicamente como personalmente. A la Facultad de Ingeniería y al colegio de Geofísica por brindarme la oportunidad de formarme profesionalmente, con todos los profesores que dieron parte de sus conocimientos y experiencias para mí formación.

Al jurado M.C. Julio César Gonzáles Hernández, M.C. Manuel Uribe Arriaga y M.C. José Luis Gonzáles Guevara, por su apoyo y tomarse el tiempo de revisar este trabajo y darme sus observaciones para mejorarlo.

Al INEGI por su atención y por facilitarme las imágenes satelitales que me ayudaron a realizar este trabajo.

Y, a todos mis amigos y compañeros que conocí durante este proceso, pero en especial a Ricardo, Jorge, David, Anita, Dayane, Luis, Néstor y Citlali. Gracias por todo su apoyo y por todos los momentos de alegría que compartí con ustedes. Hicieron que mi estancia en la universidad fuera una experiencia inolvidable en mi vida.

Índice

Resumen	8
Capítulo 1: Introducción	9
1.1 Planteamiento del problema	9
1.2 Justificación	11
1.3 Objetivo general.....	11
1.3.1 Objetivos específicos.....	12
1.4 Hipótesis	12
1.5 Alcances y limitaciones.....	13
Capítulo 2: Marco Teórico	13
2.1 Residuos Sólidos (RS).....	13
2.2 Tipos de residuos sólidos.....	14
2.2.1 Residuos sólidos urbanos (RSU)	14
2.2.2 Residuos de manejo especial (RME).....	14
2.2.3 Residuos peligrosos (RP)	15
2.3 Generación de Residuos Sólidos.....	15
2.4 Impacto ambiental asociado a residuos sólidos.....	16
2.5 Percepción remota y sistemas de información geográfica.....	16
2.6 Principios físicos	17
2.6.1 Radiación electromagnética.....	17
2.6.2 Teoría ondulatoria.....	18
2.6.3 Teoría corpuscular	19
2.6.4 Ley de Planck	19
2.6.5 Firmas espectrales	20
2.7 Sistemas espaciales de percepción remota.....	21
2.8 Características de los datos.....	22
2.8.1 Resolución espacial.....	22
2.8.2 Resolución espectral	23
2.8.3 Resolución radiométrica	24
2.8.4 Resolución temporal	24
2.9 Correcciones de los datos.....	24

2.9.1 Corrección geométrica.....	25
2.9.2 Corrección radiométrica.....	25
2.9.3 Corrección atmosférica	25
2.10 Procesamiento de imágenes satelitales.....	26
2.10.1 Índice de vegetación de diferencia normalizada	26
2.10.2 Cambio de uso del suelo	26
2.10.3 Temperatura superficial del suelo.....	27
2.10.4 Evaluación de la calidad del aire	27
2.10.5 Análisis estadístico de variables ambientales.....	28
Capítulo 3: Materiales y Área de estudio	29
3.1 Materiales	29
3.2 Área de estudio.....	30
Capítulo 4: Metodología.....	31
4.1 Cartografía manual de sitios con residuos sólidos mal ubicados en la ciudad de Puebla.....	32
4.2 Preprocesamiento de imágenes satelitales.....	36
4.2.1 Corrección geométrica.....	37
4.2.2 Corrección radiométrica.....	37
4.3.3 Corrección atmosférica	39
4.3.4 Recorte área de estudio.....	39
4.4 Procesamiento de imágenes satelitales.....	39
4.4.1 Evaluación del estrés de la vegetación.....	40
4.4.2 Cambio de uso del suelo	40
4.4.3 Estimación de la temperatura superficial del suelo.....	42
4.4.4 Evaluación de la calidad del aire	44
4.4.5 Análisis estadísticos de variables ambientales.....	46
Capítulo 5: Resultados	49
5.1 Cartografía manual de los sitios.....	49
5.2 Evaluación del estrés de la vegetación	53
5.3 Cambio de uso del suelo.....	61
5.4 Estimación de la temperatura superficial del suelo	65

5.5 Evaluación de la calidad del aire.....	74
5.6 Análisis estadísticos de variables ambientales	77
5.6.1 Análisis de componentes principales (ACP)	77
5.6.2 Regresión lineal de variables ambientales y mapa de densidad de sitios	85
Capítulo 6: Discusión.....	91
Capítulo 7: Conclusiones	100
Bibliografía	103

Índice de figuras

Figura 1. Espectro electromagnético.....	18
Figura 2. Esquema del comportamiento de la radiación electromagnética de acuerdo con la teoría ondulatoria.....	19
Figura 3. Excitación espectral de un cuerpo negro a diferentes temperaturas.....	20
Figura 4. Firmas espectrales de las superficies más comunes.....	21
Figura 5. Diferentes resoluciones espaciales de un área en común.....	23
Figura 6. Bandas espectrales y longitudes de onda de los sensores Landsat.....	23
Figura 7. Características de una imagen satelital.....	24
Figura 8. Mapa del área urbana y rural de la ciudad de Puebla y sus alrededores..	30
Figura 9. Esquema general de procesos para la evaluación del impacto ambiental asociado a los sitios con RS.....	32
Figura 10. Procedimiento para cartografía manual de sitios con RS mal gestionados.....	33
Figura 11. Imagen satelital con mallado de exploración en la ciudad de Puebla.....	33
Figura 12. Relleno sanitario de la ciudad de Puebla. Fuente: Google Earth.....	34
Figura 13. RS mal gestionados al norte de la ciudad de Puebla. Fuente: Google Earth.....	34
Figura 14. Herramienta Matriz de distancia del software QGIS.....	35
Figura 15. Herramienta Mapa de densidad del software QGIS.....	36
Figura 16. Pasos del preprocesamiento de las imágenes satelitales.....	37
Figura 17. Ejemplo de imagen con sistema SLC funcionando correctamente, SLC deshabilitado e imagen corregida.....	38
Figura 18. A) Imagen satelital de Google Earth. B) Imagen RapidEye en color real. C) Imagen en falso color.....	41
Figura 19. Ejemplos de zonas de entrenamiento. A) Vegetación boscosa. B) Cultivos. C) Lirio acuático.....	41
Figura 20. Procesos para el cálculo de la temperatura superficial del suelo.....	42
Figura 21. Script para el procesado y descarga de datos Sentinel 5p.....	45
Figura 22. Cantidad de sitios localizados en el área de estudio, agrupados en 15 clases.....	49
Figura 23. Imagen satelital con sitios ubicados con RS en la ciudad de Puebla.....	50
Figura 24. Sitios con RS y área de estudio dividida por zonas A, B, C y D.....	51
Figura 25. Cantidad de sitios con presencia de residuos sólidos en zonas A, B, C y D.....	52
Figura 26. Mapa de densidad de las ubicaciones de los sitios ubicados con RS mal gestionados en la zona A, de la ciudad de Puebla.....	53
Figura 27. Mapas NDVI de la zona de estudio para los años 2011, 2012 y 2019....	55
Figura 28. Histogramas del NDVI correspondiente a zona A, y de los sitios con RS en zona A para 2011, 2012 y 2019.....	56

Figura 29. A) Imagen satelital original en color natural. B) NDVI creado de la imagen original. C-1) Segmento del NDVI menor a 0.24. C-2) Segmento del NDVI entre 0.24 y 0.75. C-3) Segmento del NDVI mayor a 0.75.	58
Figura 30. Histogramas del NDVI correspondiente a la totalidad de la zona B, y delimitando únicamente los sitios con RS en zona B. Resultados para las imágenes de 2011 y 2012.	59
Figura 31. Histogramas del NDVI correspondiente a la totalidad de la zona C, y delimitando únicamente los sitios con RS en zona C para 2011 y 2019.	59
Figura 32. Histogramas del NDVI correspondiente a la totalidad de la zona D, y delimitando únicamente los sitios con RS en zona D. Resultados para las imágenes de 2011 y 2012.	60
Figura 33. Resultados de la clasificación de uso de suelo en los sitios ubicados en la Zona A del año 2011.	62
Figura 34. Resultados de la clasificación de uso de suelo obtenidas sobre la Zona A del año 2012.	63
Figura 35. Resultados de la clasificación de uso de suelo obtenidas sobre la Zona A del año 2019.	64
Figura 36. Mapas de temperatura superficial del suelo de la zona de estudio para los años 2011, 2012 y 2019.	66
Figura 37. Temperaturas superficiales por grupo y sitios con temperatura mayor a la media en zona A 2011.	67
Figura 38. Temperaturas superficiales por grupo y sitios con temperatura mayor a la media en zona A 2012.	68
Figura 39. Temperaturas superficiales por grupo y sitios con temperatura mayor a la media en zona A 2019.	69
Figura 40. Temperaturas superficiales por grupo y sitios con temperatura mayor a la media en zona B 2011.	70
Figura 41. Temperaturas superficiales por grupo y sitios con temperatura mayor a la media en zona B 2012.	71
Figura 42. Temperaturas superficiales por grupo y sitios con temperatura mayor a la media en zona C 2011.	71
Figura 43. Temperaturas superficiales por grupo y sitios con temperatura mayor a la media en zona C 2012.	72
Figura 44. Temperaturas superficiales por grupo y sitios con temperatura mayor a la media en zona D, de 2011.	73
Figura 45. Temperaturas superficiales por grupo y sitios con temperatura mayor a la media en zona D 2012.	74
Figura 46. Concentraciones de metano en la zona de estudio.	75
Figura 47. Concentraciones de gas metano en el área de estudio.	76
Figura 48. Plano principal para las observaciones y variables totales de 2011, 2012 y 2019.	79
Figura 49. Interpretación visual del plano principal para las variables: a) Temperatura, b) Vegetación y c) Metano.	80

Figura 50. Plano principal para las observaciones por grupos y datos totales de 2011, 2012 y 2019.....	80
Figura 51. Plano principal para las observaciones y variables de 2019.....	82
Figura 52. Interpretación visual del Plano principal para las variables: a) Temperatura, b) Vegetación y c) Metano.....	83
Figura 53. Plano principal para las observaciones por grupos y datos de 2019.	84
Figura 54. Ubicación de la región 5 del mapa de densidad y relación lineal de variables ambientales en la región y zonas.....	86
Figura 55. Ubicación de la región 4 del mapa de densidad y relación lineal de variables ambientales en la región y zonas.....	88
Figura 56. Ubicación de la región 3 del mapa de densidad y relación lineal de variables.....	89
Figura 57. Ubicación de la región 2 del mapa de densidad y relación lineal de variables ambientales en la región.	91
Figura 58. Sequía anómala en gran parte de la república mexicana	94
Figura 59. Elevación del suelo y concentración de metano en área de estudio.	97
Figura 60. Frecuencias en las direcciones del viento medidas en estaciones de monitoreo automáticas: a) Puebla y b) La Malinche II.....	97

Índice de Tablas

Tabla 1. Descripción de materiales utilizados para realizar el estudio.	29
Tabla 2. Valores para reclasificación del mapa de densidad.	36
Tabla 3. Rangos de concentración de metano para homologación de imágenes Sentinel 5p.	46
Tabla 4. Rangos para la homologación de los valores NDVI.	47
Tabla 5. Rangos para la homologación de los valores de temperatura de superficie.	47
Tabla 6. Grupos para los diferentes sitios con presencia de residuos sólidos.	49
Tabla 7. Sitios ubicados en cada una de las zonas del área de estudio.	51
Tabla 8. Fechas de imágenes satelitales utilizadas para NDVI y su zona correspondiente.	54
Tabla 9. Cobertura de los tipos de suelos en los sitios identificados con RS en 2011.	62
Tabla 10. Cobertura de suelos en los sitios identificados con RS en 2012.	63
Tabla 11. Cobertura de suelos en los sitios identificados con RS en 2019.	64
Tabla 12. Fechas de imágenes satelitales utilizadas para el cálculo de la temperatura superficial del suelo y su zona correspondiente.	65
Tabla 13. Resumen de las componentes para el ACP de los datos totales en los años 2011, 2012 y 2019 (izquierda) y los datos de 2019 (derecha).	77
Tabla 14. Correlación de las variables con las componentes del ACP para los datos totales.	78
Tabla 15. Relación de las variables con las componentes del ACP para los datos de 2019.	78

Resumen

Este trabajo de investigación estudia el impacto ambiental generado por residuos sólidos localizados en sitios no controlados en la ciudad de Puebla, los cuales representan un riesgo para el ambiente y salud de la población. Para este trabajo se localizaron y evaluaron las ubicaciones de dichos residuos mal gestionados en la ciudad de Puebla y las principales variables ambientales afectadas: vegetación, uso de suelo, temperatura superficial y calidad del aire. Dichas variables son medibles por medio de técnicas de percepción remota y el uso de sistemas de información geográfica, para conocer las características ambientales en los sitios y así identificar zonas con un alto deterioro ambiental mediante un análisis estadístico.

Capítulo 1: Introducción

1.1 Planteamiento del problema

Actualmente el crecimiento de la población, el desarrollo de nuevos procesos industriales, la urbanización y el uso de nuevos compuestos, generan una gran variedad de residuos que superan la capacidad de asimilación de la naturaleza, dañando el ambiente (Henry, J. G., & Heinke, G. W., 1999). Esta situación pone en graves problemas a todos los países, ya que la generación de residuos aumenta de manera alarmante. De acuerdo con el Banco Mundial, se generaron aproximadamente 2.01 mil millones de toneladas de residuos sólidos urbanos en 2016 y se espera que esta cantidad aumente a 3.40 mil millones de toneladas anuales para 2050 (Kaza, S., Yao, Lisa C., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F., 2018).

La alta generación de residuos sólidos (RS) hace que su gestión adecuada sea difícil de realizar, especialmente en los países en vías de desarrollo. De acuerdo con el Banco Mundial, los países con un nivel de ingreso bajo generalmente disponen el 93% de sus residuos en tiraderos a cielo abierto (sitios sin ningún control), y los países con altos ingresos disponen sólo el 2% de sus residuos en sitios sin ningún control (Kaza, S., *et al.*, 2018).

Aunque la disposición final de los residuos varía de acuerdo con cada país, la disposición final de residuos en tiraderos a cielo abierto en los países en desarrollo se mantiene como una de las principales formas de confinamiento. Así lo demuestra el Banco Interamericano de Desarrollo (2015), que indicó que para Latinoamérica y el Caribe, la disposición final de residuos sólidos urbanos en tiraderos a cielo abierto durante 2010 fue aproximadamente del 45%.

En México, la generación total estimada de residuos en 2017 fue de 120,128 toneladas por día (SEMARNAT, 2020), y donde sólo ingresa alrededor del 71.88% de los residuos generados (86,352.7 t/día) a 2203 sitios de disposición final (relleno sanitario, tiradero controlado y tiradero a cielo abierto) en toda la república (SEMARNAT, 2020). De los cuales, el 40.08% de estos sitios de disposición final no

tiene ningún tipo de control para contener la contaminación de los residuos, además de que tampoco cuentan con controles que limiten el acceso y el ingreso de desechos al sitio (SEMARNAT, 2020), lo que genera graves problemas para el ambiente y la salud humana.

La inadecuada disposición de los RS daña gravemente el ambiente y pone en riesgo la salud de las personas a su alrededor, debido a que los residuos al descomponerse liberan diversos elementos perjudiciales para el ambiente como: gases de efecto invernadero (GEI, CO₂, CH₄, N₂O), compuestos orgánicos volátiles (COV), metales pesados, y lixiviados (Vergara, S. E., & Tchobanoglous, G., 2012). Además, los sitios con RS sin control son muy peligrosos en comparación con los rellenos sanitarios, debido al acceso sin restricciones, la ausencia de equipo contra incendios y la falta de control sobre la cantidad y tipo de desechos que se depositan en el sitio (Chandrappa, R., & Das, D., 2012).

Uno de los principales riesgos de los sitios con RS mal gestionados, es el depósito sin control de cualquier tipo de residuo peligroso (tóxico, biológico, electrónico, etc.). Esto incrementa los efectos negativos de estos sitios, ya que los desechos peligrosos tienen el potencial, incluso en bajas concentraciones, de tener un significativo efecto adverso en el ambiente y la salud pública debido a sus inherentes características toxicológicas, físicas y químicas (DWAF 1998, Citado en Chandrappa, R., & Das, D., 2012).

En Puebla se presenta una situación crítica por la disposición inadecuada de los RS que daña el ambiente y expone a la población a un grave riesgo de infección. Debido a que diariamente 300 de las 1700 toneladas de residuos sólidos urbanos que se generan en la ciudad se depositan indebidamente en barrancas, ríos, calles y campos baldíos (Instituto Municipal de Planeación Puebla, 2019), agravando el impacto ambiental de la región y poniendo en riesgo la salud de la población, en especial de adultos mayores y niños. Ya que, durante la descomposición de los residuos, se liberan diversos elementos perjudiciales como GEI, dioxinas y furanos, que provocan la contaminación del aire, agua y suelo (Chandrappa, R., & Das, D., 2012), afectando las condiciones de salud de la población vulnerable, sino se toman acciones para

identificar las zonas donde se concentran más los sitios con RS no controlados en la ciudad de Puebla

1.2 Justificación

Ha sido ampliamente estudiado que la alta presencia de sitios con RS mal gestionados potencia el impacto ambiental y aumenta el riesgo de la población vulnerable a contraer enfermedades. En la ciudad de Puebla se presenta una situación crítica por la disposición inadecuada de los residuos que daña el ambiente y expone a la población a un grave riesgo. Dentro del área de estudio aún no se ha realizado un estudio que contabilice, registre y evalúe el impacto que generan los sitios con RS mal gestionados al ambiente.

El avance tecnológico dentro de los sensores remotos ha demostrado ser de gran utilidad para estudiar los efectos del impacto ambiental en las ciudades. Utilizando estas herramientas podría ser viable el análisis de las variables ambientales afectadas dentro de los sitios con RS mal gestionados en la ciudad de Puebla. Es por esto, que la presente investigación surge de la necesidad de estudiar el impacto ambiental asociado a los RS mediante las técnicas de percepción remota (PR) y sistemas de información geográfica (SIG) en la ciudad de Puebla. Para esto se tomarán en cuenta 3 variables: 1) Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (*NDVI*) y su relación con el uso de suelo, 2) temperatura superficial del suelo y 3) calidad del aire por emisiones de metano.

1.3 Objetivo general

Evaluar el impacto ambiental en la ciudad de Puebla asociado a sitios con presencia de RS mal gestionados, considerando el estrés de la vegetación, uso de suelo, temperatura superficial y calidad del aire por emisiones de metano, mediante el uso de PR y SIG.

1.3.1 Objetivos específicos

- Identificar y mapear, por medio de imágenes de Google Earth los sitios con RS mal gestionados en la ciudad de Puebla, para generar un mapa de densidad con las ubicaciones de los sitios.
- Medir el estrés de la vegetación por medio de imágenes RapidEye, aplicando del índice *NDVI*.
- Clasificar el cambio de uso del suelo en los sitios con RS por medio de imágenes *RapidEye*, mediante la clasificación supervisada de máxima verosimilitud.
- Medir la temperatura superficial del suelo por medio de imágenes *Landsat 7*, utilizando el método de umbrales *NDVI*.
- Medir y clasificar el metano presente en el área de estudio por medio de imágenes *Sentinel 5p*.
- Determinar las características de las variables ambientales medidas en los sitios con RS mal gestionados, mediante el análisis de componentes principales.
- Mostrar la relación de las variables ambientales dentro de las áreas donde se concentran los sitios con RS mal gestionados, mediante una regresión lineal.

1.4 Hipótesis

Mapear los sitios con presencia de RS mal ubicados en la ciudad de Puebla y medir las variables ambientales de vegetación, uso de suelo, temperatura superficial y calidad del aire (Metano), mediante técnicas de PR y SIG, permitirá conocer el impacto ambiental que generan los RS y la relación que tienen las variables mencionadas en las áreas donde se concentran los sitios con RS. Para identificar zonas de atención prioritaria que apoyen el mejoramiento de las condiciones ambientales de la región y se evite la exposición de la población vulnerable a fuentes de infección.

1.5 Alcances y limitaciones

Este trabajo de investigación tiene un alcance descriptivo y correlacional. Descriptivo porque pretende medir variables ambientales afectadas por la presencia de RS, mediante el uso de técnicas de PR y SIG. Correlacional, porque se caracterizarán y relacionarán las mediciones de las variables ambientales con las áreas geográficas donde se concentran los RS para zonificar áreas con un impacto ambiental en la ciudad de Puebla relacionado a la presencia de los RS.

Los resultados en este trabajo dependen principalmente de la información obtenida por plataformas de PR, por lo tanto, la resolución espacial de las imágenes disponibles es un factor importante a considerar, debido a que el metano y la temperatura de superficie, serán tomados sobre un píxel que es mayor al tamaño promedio de los sitios con RS ($60m^2$ y $1Km^2$ de resolución para la temperatura superficial y metano respectivamente). Se aconseja como trabajo futuro el realizar estudios de campo que puedan registrar y corroborar con exactitud las condiciones de los sitios con RS.

Capítulo 2: Marco Teórico

El crecimiento de la población, la urbanización y el desarrollo de nuevos compuestos químicos en las últimas décadas, han generado una gran diversidad de residuos alrededor del mundo. En México se definen tres tipos de RS: Residuos sólidos urbanos, Residuos de manejo especial y Residuos peligrosos (Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, 2018, art.5), los cuales se diferencian principalmente por sus características y por la cantidad que se genera en el país.

2.1 Residuos Sólidos (RS)

De acuerdo con Henry y Heinke, (1999). Los residuos sólidos son aquellos desperdicios que no pueden ser disueltos o transportados por corrientes de agua y que han sido descartados por su portador original (p. 568). Con lo que se puede

entender que, los RS son objetos o materiales que han sido desechados al cumplir su tiempo de vida útil. Este hecho, en conjunto al crecimiento de la población, el cambio de las costumbres y el desarrollo de nuevos procesos industriales durante las últimas décadas, han generado una gran cantidad de diversos RS en todo el mundo. Por lo que, en consecuencia, a la gran variedad de RS existentes, éstos se clasifican de acuerdo con sus características, y dependiendo de cada país se clasifican de acuerdo con su normativa.

2.2 Tipos de residuos sólidos

En México existen leyes que guían y regulan las actividades relacionadas con los RS, en los que se definen tres tipos de residuos, de acuerdo con la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR): Residuos sólidos urbanos, Residuos de manejo especial y Residuos peligrosos:

2.2.1 Residuos sólidos urbanos (RSU)

Son los generados en las casas habitación, que resulten de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos, siempre que no sean considerados por esta ley como residuos de otra índole. (Artículo 5, Fracción XXXIII)

2.2.2 Residuos de manejo especial (RME)

Son aquellos generados en los procesos productivos, que no reúnen las características para ser considerados como peligrosos o como residuos sólidos urbanos, o que son producidos por grandes generadores de residuos sólidos urbanos. (Artículo 5, Fracción XXX)

2.2.3 Residuos peligrosos (RP)

Son aquellos que posean alguna de las características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad, o que contengan agentes infecciosos que les confieran peligrosidad, así como envases, recipientes, embalajes y suelos que hayan sido contaminados cuando se transfieran a otro sitio, de conformidad con lo que se establece en esta ley (Artículo 5, Fracción XXXII).

Estas definiciones que establece la LGPGIR, sirven de base para todos los reglamentos y normas que dispongan los estados y municipios de todo México en relación con los RS.

2.3 Generación de Residuos Sólidos

La generación de RS varía de acuerdo con su tipo, siendo los de mayor cantidad los RSU. En México, de acuerdo con la SEMARNAT (2020), se estima que cada persona genera alrededor de 0.944 Kg de residuos al día, dando un total nacional de 120,128 toneladas de RSU al día. Para el estado de Puebla, de acuerdo con la SEMARNAT (2020), se estima la generación de RSU en 5,991 toneladas de residuos por día, de las cuales, sólo la ciudad de Puebla se genera alrededor de 1700 toneladas (Instituto Municipal de Planeación Puebla, 2019).

El registro de la generación de los RME en México ha sido complicado en los últimos años por la falta de claridad jurídica. De acuerdo con el DBGIR de la SEMARNAT (2020), las entidades estatales y municipales no pueden hacerse cargo por sí solos del manejo de los RME, por lo que dicha tarea de supervisión le corresponde a la SEMARNAT, pero dicha institución carece de autoridad suficiente para realizarla. Además, la normativa va dirigida principalmente a los grandes generadores de residuos, en vez de dirigirse a los tipos de residuos generados, por lo que la información referente a los RME es escasa y no se puede dar una cantidad precisa de lo que se genera en México.

Para el caso de los RP, la generación total en 2017 fue de 2,447,596 toneladas, siendo los establecimientos de carácter industrial los que aportaron el 94.7% de los RP (SEMARNAT, 2020). Para el caso del estado de Puebla la generación estimada de RP fue de 32,231 toneladas en 2017 (SEMARNAT, 2020).

2.4 Impacto ambiental asociado a residuos sólidos

La generación, gestión y manejo de los residuos se asocian con impactos positivos al eliminar los desechos acumulados, pero normalmente se asocia con efectos negativos que contribuyen al cambio climático, a la degradación del ambiente y afectaciones en la salud pública (Chandrappa, R., & Das, D. B., 2012; Vergara, S. E., & Tchobanoglous, G., 2012)

El impacto que generan los RS al ambiente contamina directa e indirectamente agua, suelos y aire, dentro de los sitios donde se encuentren depositados. Siendo el suelo, una de las principales variables ambientales afectadas por la presencia de estos residuos, ya que al estar en contacto directo se depositan metales pesados y compuestos orgánicos durante el flujo de los lixiviados al subsuelo (Chandrappa, R., & Das, D., 2012; Vergara, S. E., Tchobanoglous, G. 2012). Además, estos residuos también impactan en la calidad del aire, debido a que liberan una variedad de gases contaminantes a la atmósfera como el CO₂, CH₄, olores desagradables, COV, GEI, etc. (Vergara, S. E., & Tchobanoglous, G., 2012).

2.5 Percepción remota y sistemas de información geográfica

La percepción remota (PR) es la ciencia y arte de obtener información de un objeto, área o fenómeno mediante el análisis de datos adquiridos por instrumentos que no están en contacto directamente con el objeto, área o fenómeno de estudio (Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J., 2015). El medio que permite adquirir dicha información de los objetos y fenómenos de interés en la superficie hacia el instrumento se genera con la propagación de las ondas electromagnéticas a través del espacio, por la reflexión, refracción o dispersión de la energía con los objetos de superficie, la

cual es registrada y almacenada para su procesamiento y posterior análisis. En la actualidad existe una gran cantidad de sensores remotos que monitorean la superficie de la tierra todos los días, lo que facilita la obtención de información y su posterior análisis a través de diversos softwares geográficos.

Un sistema de información geográfica (SIG) es un sistema computarizado elaborado para ayudar en la recolección, mantenimiento, almacenamiento, análisis, producción y distribución de datos e información espacial (Bolstad, P., 2016). Actualmente el uso de los SIG ha crecido en muchas disciplinas, ya que dentro de ellos se pueden representar una gran cantidad de objetos y fenómenos de la realidad de forma digital, por medio de dos tipos de datos: los datos vectoriales y datos ráster. Estos tipos de datos permiten no solo la representación digital de aspectos de interés cartográfico, sino que permiten la aplicación de diversos cálculos que brindan información relevante de un sitio o fenómeno.

2.6 Principios físicos

Los principios físicos que permiten el uso de la PR como herramienta para el estudio de los fenómenos en superficie, se originan con la comprensión del espectro electromagnético y sus interacciones con los diferentes elementos de la atmósfera y superficie. A continuación, se mencionan los principales elementos en los cuales se basa la PR.

2.6.1 Radiación electromagnética

La luz visible es una de muchas formas en las que se puede muestra la radiación electromagnética, donde se encuentran los rayos ultravioletas, rayos X, microondas, entre otras más. Las diferentes formas en las que se presenta la radiación electromagnética se dividen en varias regiones espectrales, mejor conocidas como regiones. Las cuales pueden diferenciarse unas de otras por sus propiedades físicas.

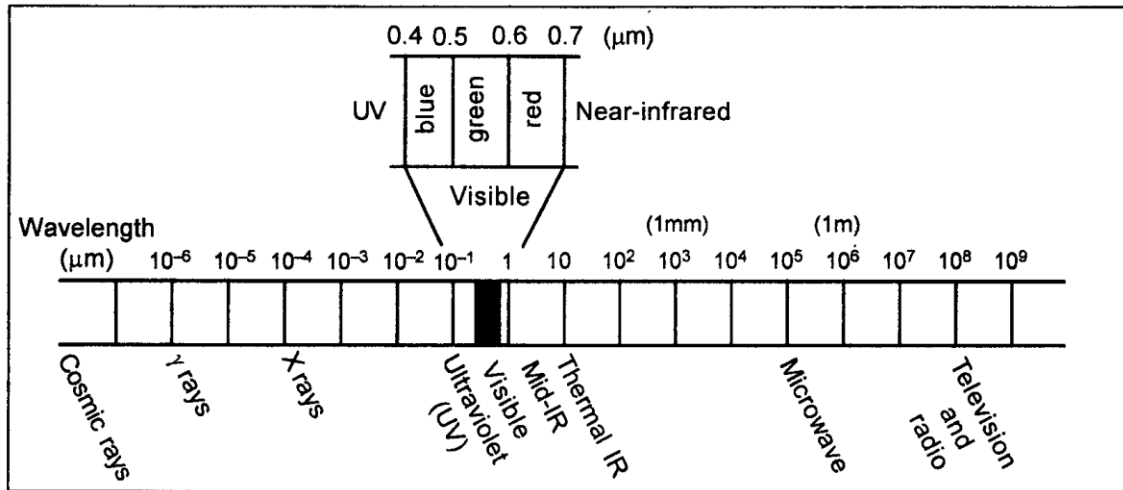


Figura 1. Espectro electromagnético. Fuente: Reddy, M. A. (2008).

Las propiedades de las regiones del espectro electromagnético se pueden explicar mediante dos teorías: Ondulatoria y Corpuscular. Las cuales han ayudado a describir el comportamiento de la luz en diferentes fenómenos, ya que la luz tiene un doble comportamiento (onda-partícula), dependiendo el punto de observación la luz puede comportarse de formas distintas.

2.6.2 Teoría ondulatoria

Esta teoría considera el comportamiento de la radiación electromagnética como una onda sinusoidal. La cual está compuesta por un campo eléctrico (E) y un campo magnético (M), perpendiculares entre sí, con respecto a la dirección de propagación y que viajan a la velocidad de la luz. Estas ondas que conforman a la radiación electromagnética se pueden describir de acuerdo con su longitud de onda y su frecuencia, utilizando la siguiente ecuación:

$$c = \lambda F$$

Donde:

c = Velocidad de la luz

λ = Longitud de onda

F = Frecuencia

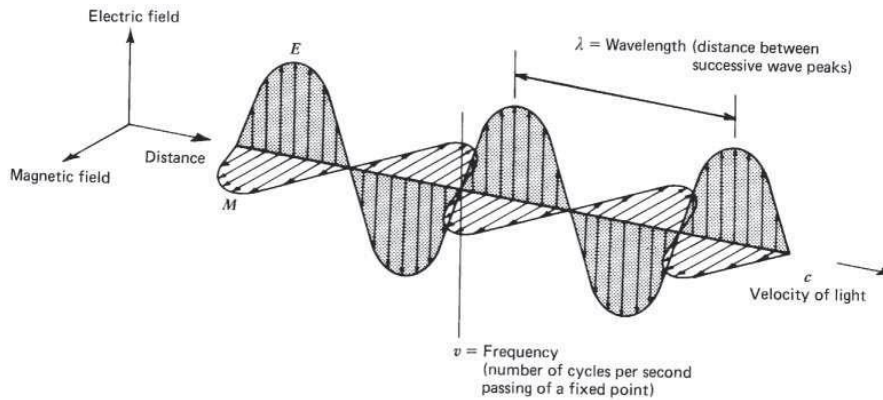


Figura 2. Esquema del comportamiento de la radiación electromagnética de acuerdo con la teoría ondulatoria . Fuente: Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J., (2015).

2.6.3 Teoría corpuscular

Esta teoría describe a la luz como un conjunto de pequeñas partículas llamadas fotones, que no tienen masa ni carga y que viajan en línea recta. Esta teoría se relaciona directamente con la teoría ondulatoria por medio de la ecuación de Planck:

$$Q = h\nu$$

Donde:

Q = Energía del foton

$h = 6.626 \times 10^{-34} J s$ (Constante de Planck)

ν = Frecuencia

La relación de la ecuación de Planck con la teoría ondulatoria muestra que mientras mayor sea la longitud de onda, menor será la energía del fotón. Esta teoría ayudo a describir diversas interacciones de la energía con la materia, por ejemplo, el fenómeno de cuerpo negro.

2.6.4 Ley de Planck

La ley de Planck indica que todos los objetos con una temperatura mayor al cero absoluto emiten energía radiante. Por lo que todos los objetos pueden ser

observados en las diferentes regiones del espectro electromagnético y permite conocer la longitud de onda en la que se encuentra la energía radiante del objeto, en función de su temperatura. La energía radiante que emite un objeto puede ser calculada con la siguiente ecuación:

$$S(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 e^{ch/\lambda kT} - 1}$$

Donde:

$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J s}$ (Constante de Planck)

$k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ W s}^2 / \text{K}$ (Constante de Boltzmann)

$c = 3 \times 10^8 \text{ m / s}$ (Velocidad de la luz)

$\lambda =$ Longitud de onda

$T =$ Temperatura absoluta en grados Kelvin

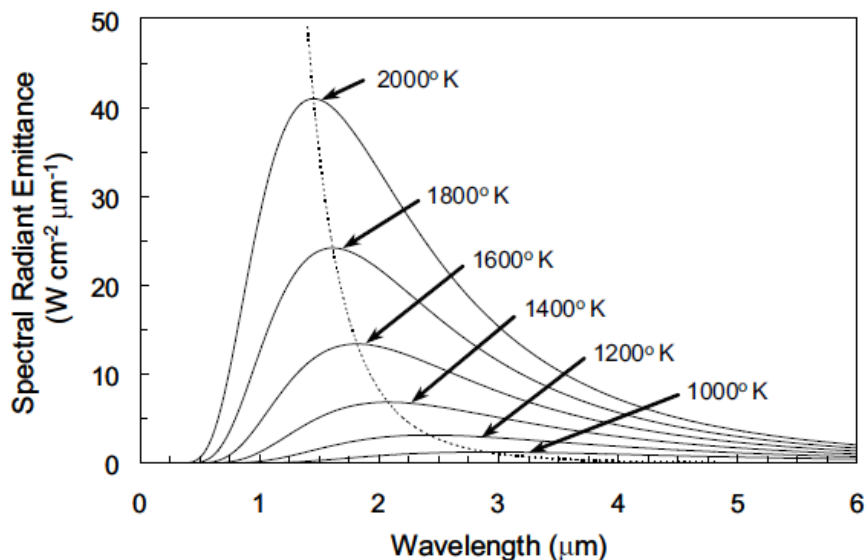


Figura 3. Excitación espectral de un cuerpo negro a diferentes temperaturas. Fuente: Elachi, C., & Van Zyl, J., (2006).

2.6.5 Firmas espectrales

La energía electromagnética, al incidir con las diferentes superficies de la tierra se fracciona y es reflejada, absorbida y transmitida de nuevo al espacio. De estas

interacciones que tiene la energía con las diferentes superficies de la tierra, la más importante es la energía reflejada, también conocida como reflectancia. El valor de la reflectancia puede variar de acuerdo con la longitud de onda en la que se encuentre y al tipo de material con el que interaccione la energía, generando una respuesta única y característica para cada una de las superficies. Esta característica única, se les conoce como firma espectral, la cual permite diferenciar los diversos tipos de superficies terrestres.

Una firma espectral permite describir la respuesta espectral de una superficie u objeto en una región particular del espectro electromagnético. La cual depende de diversos aspectos como: la elevación, orientación del sol, el ángulo del sensor entre otros más. Las firmas espectrales de los elementos generan una base sólida para la aplicación de la PR en una gran cantidad de disciplinas.

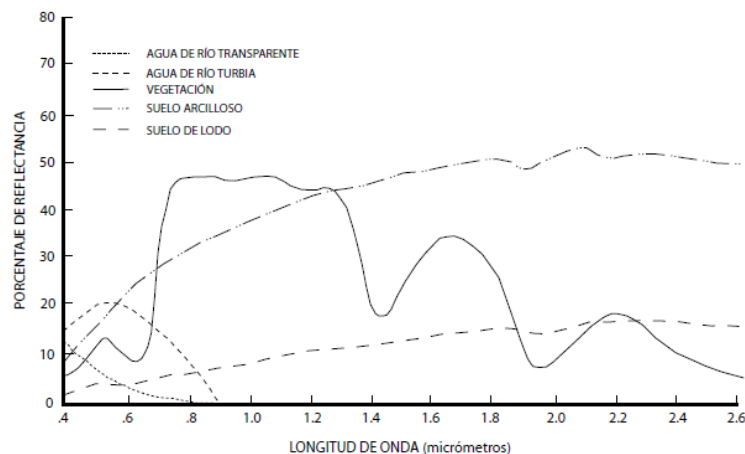


Figura 4. Firmas espectrales de las superficies más comunes. Fuente: Gómez, R. A., (2009).

2.7 Sistemas espaciales de percepción remota

Las interacciones de la energía con los diferentes objetos en la superficie terrestre son registradas por sensores que se encuentran a bordo de plataformas satelitales, las cuales almacenan la información y la envían de vuelta a la tierra para su procesamiento y posterior análisis. Los sensores que registran la información de superficie se pueden dividir en dos principales grupos: activos y pasivos. Los activos

son los sensores que utilizan una fuente propia de energía, capaz de generar ondas electromagnéticas y registrarlas de regreso. Los sensores pasivos al contrario que los activos, necesitan de una fuente externa que genere ondas electromagnéticas, por lo que únicamente registran la energía de otras fuentes, como las ondas de radio.

En la actualidad existe una gran cantidad de plataformas satelitales que monitorean diariamente la superficie terrestre y ofrecen su información de forma gratuita. Entre estas plataformas de acceso libre destacan las misiones *Landsat* y *Sentinel*, las cuales ofrecen diferentes características en la información que brindan al público en general.

2.8 Características de los datos

Los datos que proporcionan las plataformas satelitales pasan por un procesamiento para que el usuario final utilice esta información para el estudio de los objetos y fenómenos en superficie. Esta información posee diferentes características de acuerdo con el tipo de sensor que realizó las mediciones, por lo que cada sensor proporciona información con características diferentes. Las características de esta información pueden ser descritas por cuatro tipos de resoluciones en los sensores (espacial, espectral, radiométrica y temporal), que de acuerdo con los objetivos y limitaciones en los proyectos serán de gran utilidad. A continuación, se describen las principales resoluciones en la información proporcionada por los sensores.

2.8.1 Resolución espacial

La resolución espacial es el objeto más pequeño que el sensor es capaz de distinguir. Este factor es clave para determinar el grado de detalle que puede tener una imagen satelital. En general, mientras mayor sea la resolución espacial, mayores serán los detalles que podrán distinguirse en la imagen (Reddy, M. A., 2008).

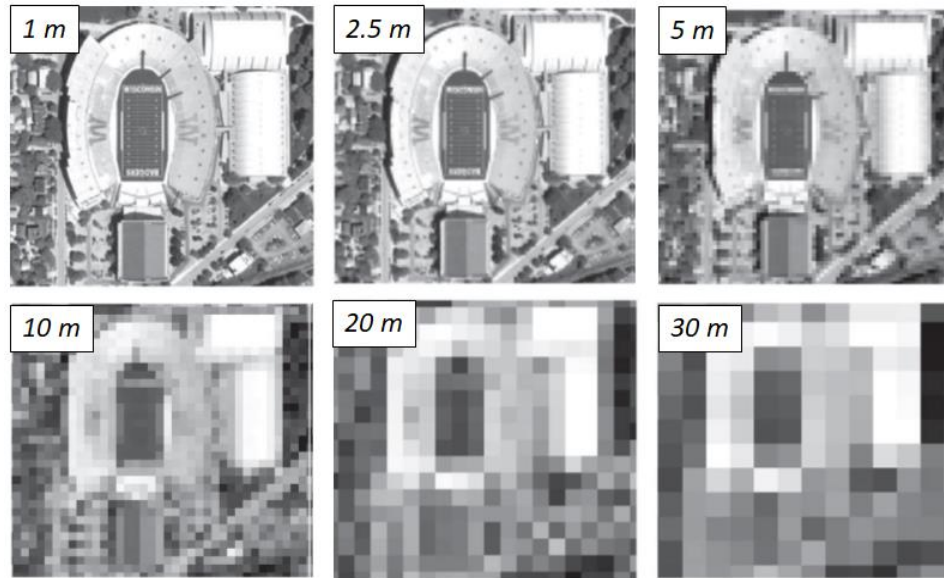
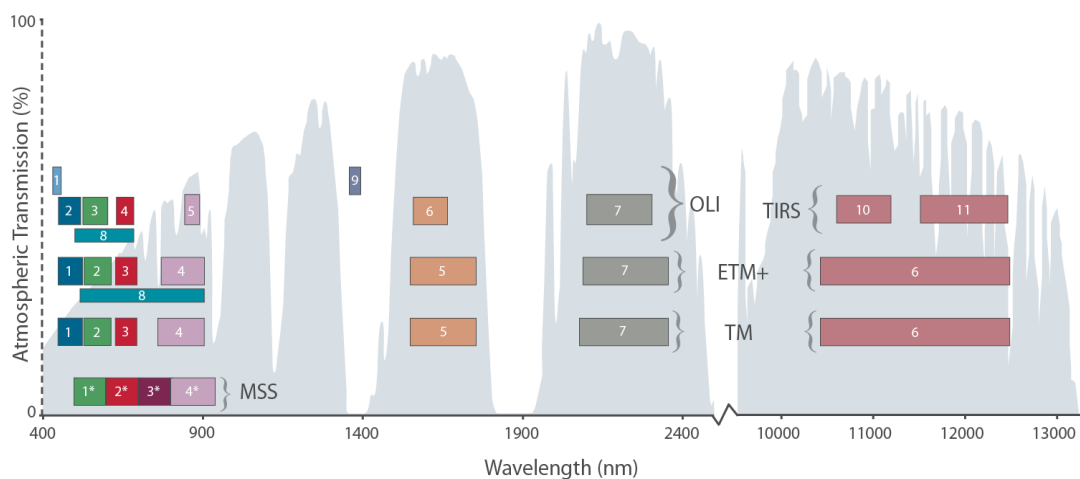


Figura 5. Diferentes resoluciones espaciales de un área en común. Fuente: Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J., (2015).

2.8.2 Resolución espectral

Indica el rango de longitud de onda de las bandas espectrales que puede diferenciar el sensor, para registrar el comportamiento de las diferentes coberturas sobre la superficie terrestre. Dependiendo de cada sensor, la resolución espectral cambiará. La resolución espectral de los sensores de *Landsat* (TM, ETM+, OLI y TIRS) se muestra en la imagen siguiente.



* MSS bands 1-4 were known as bands 4-7, respectively, on Landsats 1-3

Figura 6. Bandas espectrales y longitudes de onda de los sensores Landsat. Fuente: U. S. Geological Survey, (2019).

2.8.3 Resolución radiométrica

Es el número de niveles digitales utilizados para expresar la radiación recibida por el sensor. Mientras más niveles digitales tenga una imagen satelital, mayor será la capacidad de distinguir diferencias entre varios tonos de grises dentro de un píxel. Normalmente se representa en términos de Bits.

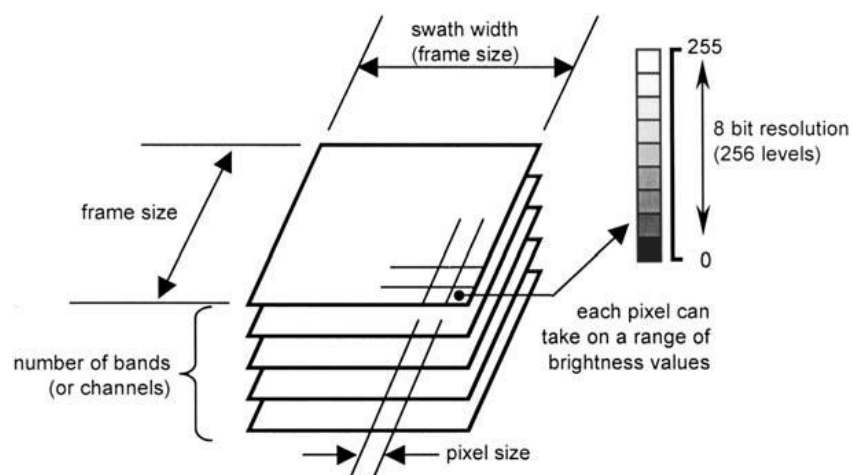


Figura 7. Características de una imagen satelital. Fuente: Richards, J. A., & Jia, X., (2006)

2.8.4 Resolución temporal

Se refiere a la habilidad para detectar cambios sobre períodos de tiempo cortos o largos. Es la frecuencia en la que un sensor vuelve a pasar sobre un mismo lugar. La frecuencia varía dependiendo del tipo de sensor.

2.9 Correcciones de los datos

Son los procesos que permiten eliminar defectos en las imágenes, para mejorar la calidad de la información final. Debido a que una imagen puede presentar diferentes errores, ya sea en la geometría o en las mediciones de los valores de brillo del píxel. Estos errores dependen de muchos factores, pudiendo ser originados por

algún error en los aparatos de medición, por los efectos de la atmósfera e incluso de la misma radiación solar. Las principales correcciones que se realizan son:

2.9.1 Corrección geométrica

Ajusta las distorsiones generadas durante la toma de la imagen, las cuales se originan por diversos factores como: la rotación de la tierra, el campo de visión del sensor, la curvatura de la tierra, entre otros. Los ajustes se realizan por medio de funciones numéricas que reorientan los píxeles.

2.9.2 Corrección radiométrica

Son las técnicas que modifican y corrigen los niveles digitales originales de una imagen satelital, con el fin de aproximar las mediciones a un muestreo ideal. Los posibles errores más comunes que se pueden presentar es el bandeo de la imagen o píxeles fuera de rango, ocasionados por un mal funcionamiento del sensor al recopilar la información.

2.9.3 Corrección atmosférica

Son los métodos para disminuir los efectos de la interacción de la energía con la atmósfera. Ya que la interacción de la energía incidente sobre los elementos que componen la atmósfera absorbe y dispersan la energía en las diferentes longitudes de onda, afectando las mediciones del sensor. Para corregir estas interacciones de la atmósfera en las imágenes satelitales, se han desarrollado diversos métodos que reducen sus efectos. De los cuales, destaca el método de sustracción de píxeles oscuros (*DOS 1, Dark Object Subtraction* por sus siglas en inglés). Este método se basa en las propias características de la imagen. La cual supone que las radiancias recibidas por píxeles completamente oscuros, se debe al efecto de la dispersión atmosférica, ya que en la realidad hay muy pocos objetos completamente oscuros (Congedo, L., 2016).

2.10 Procesamiento de imágenes satelitales

El procesamiento de las imágenes satelitales permite obtener información más detallada de una determinada zona, al combinar o transformar las diferentes respuestas que ofrecen las bandas espectrales. Dentro de este estudio, los procesos más importantes son los siguientes:

2.10.1 Índice de vegetación de diferencia normalizada

El índice de vegetación de diferencia normalizada, mejor conocido como *NDVI* (*Normalized Difference Vegetation Index*, por sus siglas en inglés). Es uno de los índices más utilizados en PR, debido a su facilidad de uso e interpretación. Este índice sirve para diferenciar entre la vegetación saludable y la vegetación deteriorada en grandes extensiones. El *NDVI* se basa en la diferencia de reflectancia en las bandas del infrarrojo cercano y del rojo.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Donde:

NIR = Banda del infrarrojo cercano

RED = Banda del rojo

2.10.2 Cambio de uso del suelo

El cambio de uso del suelo son las modificaciones que sufre el suelo debido a diversos factores, ya sean naturales o artificiales como el crecimiento de la mancha urbana, la agricultura, ganadería entre otros, que generan un impacto negativo en la cubierta vegetal natural. La cuantificación de los cambios de uso del suelo se puede realizar mediante la aplicación de algoritmos de clasificación supervisada, los cuales agrupan a los píxeles en diferentes clases, basándose en una muestra representativa para cada clase.

Uno de los algoritmos de clasificación supervisada más utilizado en PR, es la clasificación de máxima verosimilitud, el cual asume que los datos para cada clase siguen una distribución de probabilidad normal. Este algoritmo estima la probabilidad de cada píxel para pertenecer a cada una de las clases, asignando el píxel a la clase con mayor probabilidad de pertenencia.

2.10.3 Temperatura superficial del suelo

La temperatura superficial del suelo es una estimación de la energía radiante de las diferentes coberturas superficiales, como la vegetación, agua, suelo entre otras. Esta estimación de la temperatura se basa en el principio de que todos los objetos emiten una radiación electromagnética dependiendo de su temperatura. Mientras más caliente se encuentre un objeto, su longitud de onda será más pequeña y emitirá mayor energía térmica. La temperatura superficial del suelo se puede obtener por diferentes métodos, pero en este trabajo se calculó mediante el método de umbrales *NDVI* visto en Sobrino J. A. *et al.*, (2004).

2.10.4 Evaluación de la calidad del aire

En el mundo, la calidad del aire cambia a través del tiempo y varía la concentración de contaminantes por la magnitud de las fuentes emisoras, la densidad de éstas, la topografía y el estado de la atmósfera (Godish T., 2003). Dentro de las fuentes emisoras de contaminación existen las de origen natural y las de origen artificial, esta última es la que tiene un mayor impacto en la calidad del aire, debido al gran número de fuentes contaminantes que afectan la salud pública y aumentan la concentración de los GEI deteriorando la calidad del aire.

Uno de los gases que más afecta la calidad del aire en la actualidad es el metano. Este es el segundo gas más importante de efecto invernadero de larga duración y del cual aproximadamente el 60% de las emisiones se relacionan directamente con la ganadería, explotación de combustibles, residuos, etc. (Organización Meteorológica Mundial, 2018). En México, las emisiones de metano por el sector residuos en 2015

fueron de 45,909.01 Gg de CO_{2e}, representando el 6.56% del total emitido, de los cuales, la disposición final de los residuos aportó 21,920.61 Gg de CO_{2e} representando el 47.7% de las emisiones del sector residuos (SEMARNAT & INECC, 2018).

El monitoreo de los gases que afectan la calidad del aire en una región puede realizarse por medio de imágenes satelitales, las cuales son de gran ayuda para las regiones que no cuentan con estaciones de monitoreo capaces de caracterizar la presencia de este tipo de gases. La información que proporciona el monitoreo de los gases sirve para la toma oportuna de acciones y políticas, que regulen y mejoren las condiciones en la calidad del aire de la región.

2.10.5 Análisis estadístico de variables ambientales

Dentro de la estadística existen diferentes técnicas de análisis que permiten comprender, caracterizar y conocer la relación que existe entre una o más variables. Los análisis estadísticos en este trabajo se realizan mediante la aplicación del análisis de componentes principales y la regresión lineal a las observaciones de las variables ambientales en los sitios con RS y en las áreas donde se concentran dichos sitios respectivamente.

La regresión lineal es una de las técnicas más usadas en diversos campos del conocimiento. Esta técnica se utiliza para encontrar la relación o dependencia que existe entre las variables que influyen en un fenómeno. Esto se logra al construir una función que mejor se ajuste a los datos.

El análisis de componentes principales es el método de análisis de datos multivariantes más utilizado debido a la simplicidad de su álgebra y a su sencilla interpretación. Este análisis permite reducir las dimensiones de un conjunto de datos, manteniendo la mayor cantidad de información posible. Esto se consigue transformando los datos a un nuevo conjunto de variables llamadas componentes principales, las cuales no están relacionadas entre sí, y las primeras componentes mantienen la mayor parte de la información de las variables originales.

Capítulo 3: Materiales y Área de estudio

3.1 Materiales

Este trabajo de investigación tiene como fuentes principales de información los reportes, estudios y artículos realizados por dependencias oficiales del gobierno e investigadores de diversas universidades. También se hará uso de diversas imágenes satelitales de resolución alta y moderada, las que serán procesadas en un equipo de cómputo básico que cuenta con softwares de acceso libre, para el análisis espacial que ayudará al procesado de la información.

Tabla 1. Descripción de materiales utilizados para realizar el estudio.

Material	Descripción
Equipo de cómputo	Computadora portátil marca <i>Lenovo</i> con procesador <i>intel(R) core i3(TM)</i> y 8 GB de memoria RAM
Softwares de análisis	<i>QGIS</i> versión 3.12.1. Software de sistemas de información geográfica. <i>Google Earth</i> . Software de análisis geográfico <i>SNAP 8.0</i> . Software de procesamiento de imágenes satelitales <i>R</i> . Software de análisis estadístico
Localización de sitios de disposición final oficiales	Localización de sitios con presencia de residuos sólidos en la ciudad de Puebla, utilizando las imágenes de alta resolución de <i>Google Earth</i> .
Imágenes satelitales	Imágenes multiespectrales de alta y moderada resolución, de los satélites <i>RapidEye</i> , <i>Landsat 7</i> y <i>Sentinel 5p</i> .
	Fecha de imágenes: (<i>RapidEye</i>) 11/06/2011, 05/10/2011, 28/10/2011, 28/05/2012, 22/07/2012, 27/07/2012, 21/10/2012, 27/05/2019. (<i>Landsat 7</i>) 07-16/05/2011, 23-30/10/2011, 02/05/2012, 28/07/2012-06/08/2012, 16-25/10/2012, 13-22/05/2019. (<i>Sentinel 5p</i>) 12/2018, 04/2019, 05/2019, 06/2019, 03/2020, 10/2020.

3.2 Área de estudio

La ciudad de Puebla se encuentra entre las coordenadas 19° 02' 38" de latitud norte y 98° 11' 50" de latitud oeste. Dentro del valle de Puebla-Tlaxcala que rodean los volcanes Popocatepétl e Iztaccíhuatl al oeste y Malinche al noreste, a una altitud de 2,137 msnm. El área de estudio abarca los municipios de Amozoc, Chignautla, Coronango, Cuautlancingo, Juan C. Bonilla, Ocoyucan, Puebla, San Andrés Cholula, San Gregorio Atzompa, San Miguel Xoxtla, San Pedro Cholula, Teziutlán y Tlaltenango pertenecientes al propio estado de Puebla. Dichos municipios tienen una población aproximada de 2,530,024 habitantes, que representa el 38.4% de la población total del estado (6,583,278) (INEGI, 2021). Como resultado de la alta concentración de la población en la ciudad y el cambio de sus costumbres, ha generado que la gestión de los residuos se vuelva cada día más compleja y difícil de realizar. La ciudad de Puebla presenta una gran acumulación de RS en barrancas, ríos, campos baldíos, etc. agravando la contaminación ambiental de la región y aumentando las fuentes de infección a la población.

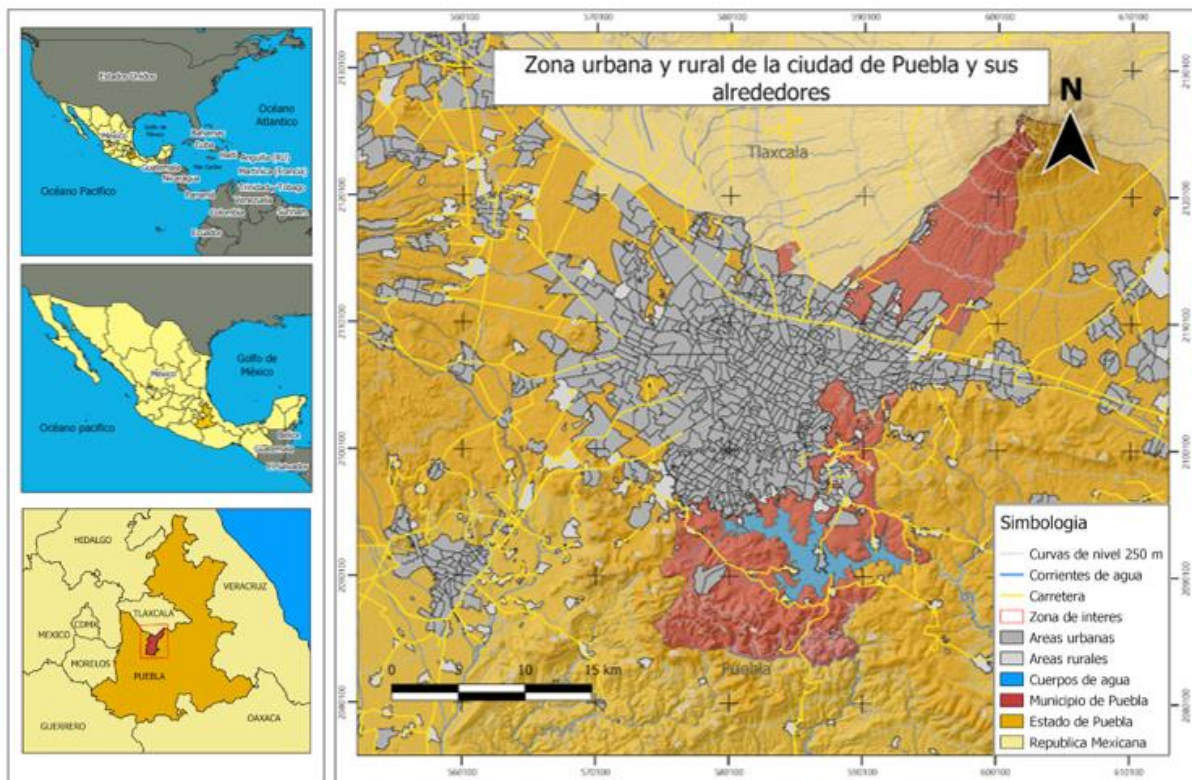


Figura 8. Mapa del área urbana y rural de la ciudad de Puebla y sus alrededores.

Capítulo 4: Metodología

Este trabajo de investigación se basará principalmente en los siguientes pasos:

- **Adquisición de información geoespacial:** Descarga y adquisición de imágenes satelitales e información espacial del área de estudio.
- **Cartografía manual y mapa de densidad:** Localizar y mapear manualmente sitios con presencia de RS, mediante un mallado en el área de estudio, para generar un mapa de densidad con las ubicaciones de los sitios.
- **Preprocesamiento de imágenes:** Corrección de posibles distorsiones radiométricas, geométricas y eliminación de errores en las imágenes satelitales.
- **Evaluación del estrés de la vegetación:** Medir la salud de la vegetación, mediante la aplicación del índice *NDVI*, para conocer el grado de afectación de la vegetación asociada a los sitios con RS.
- **Clasificación del cambio de uso del suelo:** Determinar los tipos de suelo, mediante la clasificación supervisada de máxima verosimilitud, para encontrar los suelos predominantes en los sitios con RS.
- **Evaluación de la temperatura superficial del suelo:** Medir la temperatura en la superficie mediante el método de umbrales *NDVI*, para localizar anomalías de calor asociadas a la presencia de RS.
- **Evaluación de la calidad del aire por presencia de metano:** Medición y clasificación de la cantidad de gas metano en la zona de estudio.
- **Análisis de componentes principales:** Determinar las características de las variables ambientales medidas dentro de los sitios con RS.
- **Regresión lineal de variables ambientales en mapa de densidad:** Mostrar el grado de relación de las variables ambientales dentro de las zonas donde se concentran los sitios con RS.
- **Análisis de resultados:** Evaluación de los resultados obtenidos.

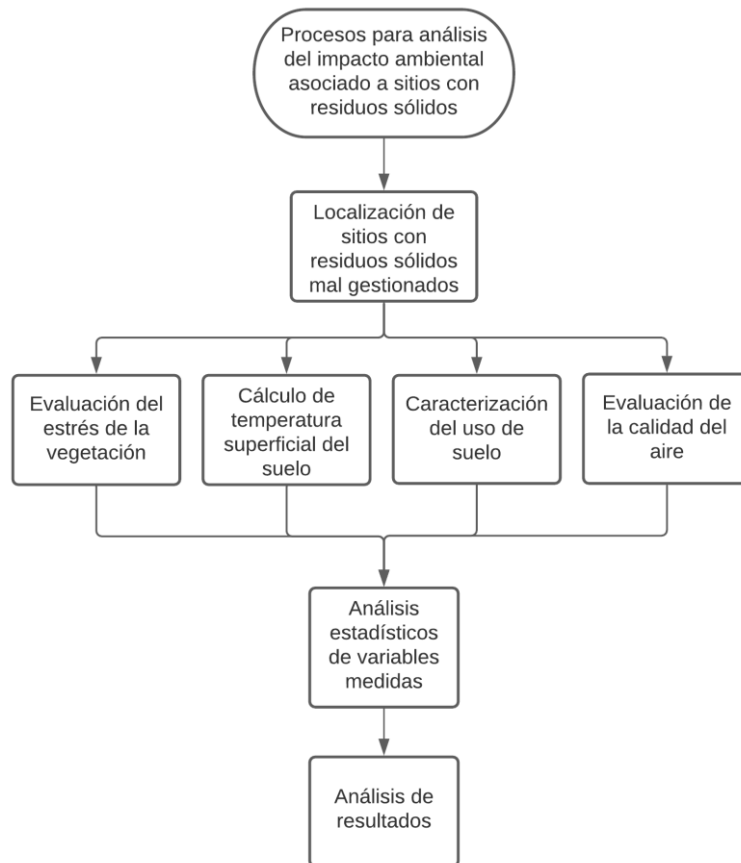


Figura 9. Esquema general de procesos para la evaluación del impacto ambiental asociado a los sitios con RS.

4.1 Cartografía manual de sitios con residuos sólidos mal ubicados en la ciudad de Puebla.

La búsqueda de sitios con RS mal gestionados se realizó entre las fechas de noviembre de 2016 a diciembre de 2020, por medio del software *Google Earth*. Para iniciar la búsqueda se siguieron los siguientes pasos:

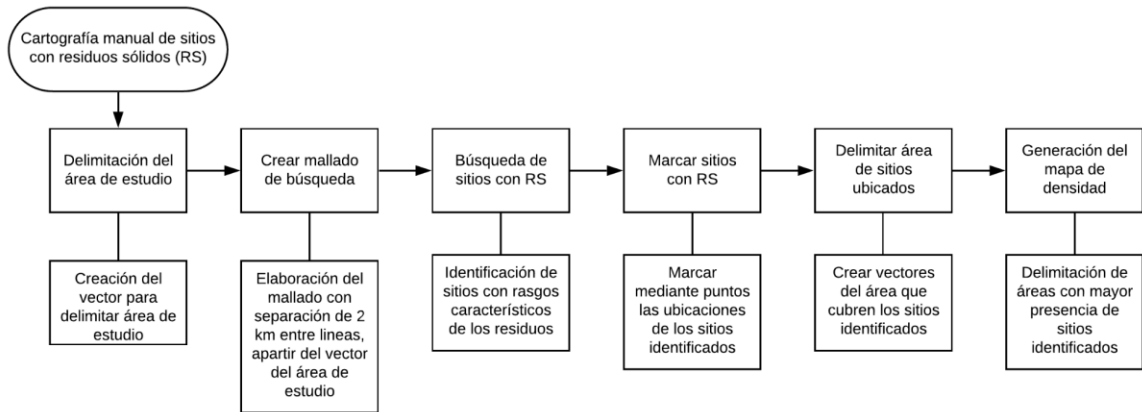


Figura 10. Procedimiento para cartografía manual de sitios con RS mal gestionados.

El primer paso para realizar la búsqueda fue la delimitación del área de estudio, ya que la ciudad de Puebla tiene una extensa dimensión, se procuró mantener dentro las zonas industriales y las zonas habitacionales más grandes. La creación del polígono que delimita y divide la zona de estudio se creó por medio del software libre QGIS 3.12.1.

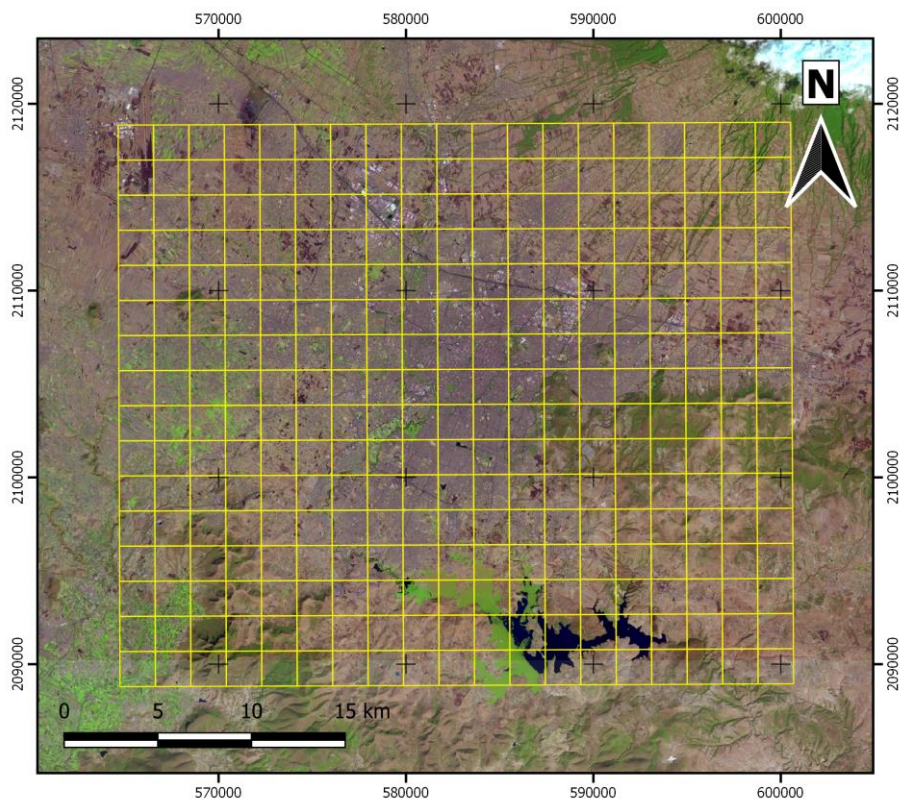


Figura 11. Imagen satelital con malla de exploración en la ciudad de Puebla (02 de enero del 2018).

La búsqueda de los RS se realizó dentro del software *Google Earth*, ya que contiene una gran variedad de imágenes satelitales de alta resolución que sirven para distinguir mejor los sitios con RS mal gestionados. Para la localización de los sitios se ubicaron lugares conocidos con residuos, como el relleno sanitario de la ciudad de Puebla, para tener una idea clara del aspecto que tienen los sitios con RS, y así tener una base en la búsqueda de los sitios.



Figura 12. Relleno sanitario de la ciudad de Puebla. Fuente: Google Earth.

Una vez ubicados los sitios con presencia de RS, se procedió a marcarlos y delimitar las áreas por medio de puntos y polígonos. Para después realizar el procesamiento del mapa de densidades.



Figura 13. RS mal gestionados al norte de la ciudad de Puebla. Fuente: Google Earth.

Para generar el mapa de densidades, se utilizó la metodología de Rizzatti, M., *et al.*, (2020). Con las ubicaciones de los sitios identificados, primero se calculó la matriz de distancias de los sitios, utilizando la caja de procesos de *QGIS*, donde se especificó que el archivo de salida fuera el resumen de las distancias, de los sitios ubicados.

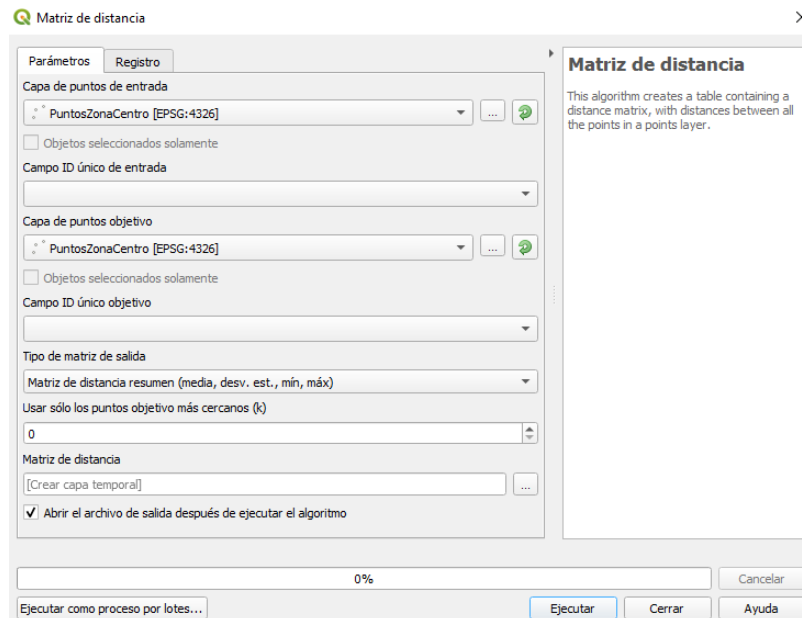


Figura 14. Herramienta Matriz de distancia del software *QGIS*.

Generada la matriz de distancias, se calculó la media de las distancias y de la desviación estándar, para obtener el radio de influencia para el mapa de densidad usando la siguiente ecuación.

$$R = \overline{X} \pm \overline{X}_\sigma$$

Donde:

R = Radio de influencia

\overline{X} = Distancia media

\overline{X}_σ = Desviación estándar media

Ya calculado el radio de influencia de los sitios, se utilizó la herramienta de mapa de densidad de *QGIS*, en el cual se especificaron las ubicaciones de los sitios, el valor del radio de influencia, el tamaño de píxel 15m y el tipo de forma del kernel, el cual fue del tipo cuartico.

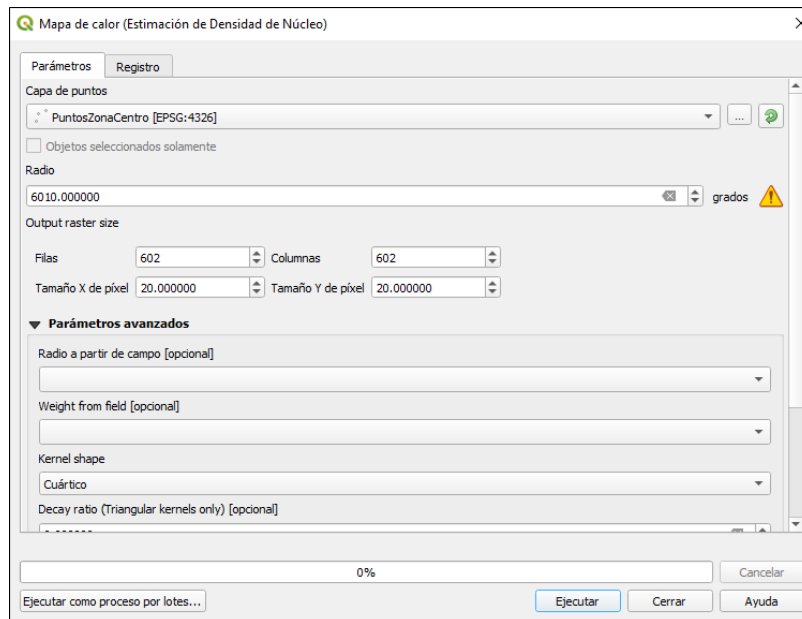


Figura 15. Herramienta Mapa de densidad del software QGIS.

Una vez generado el mapa de densidades, se clasificó en 5 grupos, para indicar de forma más sencilla el grado de concentración de los sitios dentro del área. Esta clasificación del mapa se realizó utilizando la siguiente tabla:

Tabla 2. Valores para reclasificación del mapa de densidad.

Clase	Valores
1	0 - 9.4
2	9.4 - 20.9
3	20.9 - 32.5
4	32.5 - 45.9
5	45.9 - 65.5

4.2 Preprocesamiento de imágenes satelitales

El procesamiento de la información espacial consistió en cambiar la proyección de la información, corrección radiométrica, corrección atmosférica y recorte del área de estudio. Este preprocesamiento se realizó mediante el siguiente diagrama.

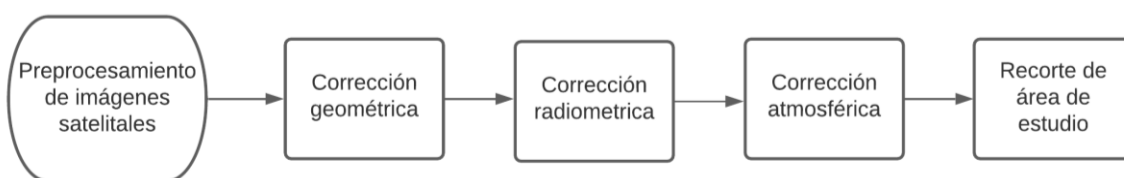


Figura 16. Pasos del preprocesamiento de las imágenes satelitales.

4.2.1 Corrección geométrica

Las imágenes adquiridas contaban con un procesamiento previo que elimina las distorsiones en la geometría de la imagen, por lo que no fue necesario aplicar algún algoritmo de corrección. Lo único que se realizó fue el ajuste en la proyección de las imágenes, a la proyección de WGS84 zona 14 Norte.

4.2.2 Corrección radiométrica

Después del ajuste en la proyección de la información, se procedió a realizar una revisión rápida de las imágenes para identificar posibles errores y posteriormente convertir los números digitales a radiancia, y de radiancia a reflectancia aparente. El principal error que se encontró consiste en la presencia de líneas sin datos con un patrón de zigzag a lo largo de todas las imágenes de *Landsat 7*. Este error se originó el 31 de mayo de 2003 por un fallo en el sistema corrector de líneas de barrido del sensor (*SLC* por sus siglas en inglés *Scan Line Corrector*), que se encargaba de compensar el movimiento de la nave durante la adquisición de la información.

Para corregir este error se deben rellenar los espacios sin valores por medio de una máscara y realizar una interpolación. La máscara se puede crear o se puede hacer uso de la proporcionada por *Landsat* al descargar la imagen. El proceso de rellenado se realizó con la herramienta “Rellenar sin datos” del software *QGIS*. La cual realiza una unión del ráster original con la máscara y posteriormente realiza una interpolación por el vecino más cercano, para asignarle un valor a cada espacio sin datos.

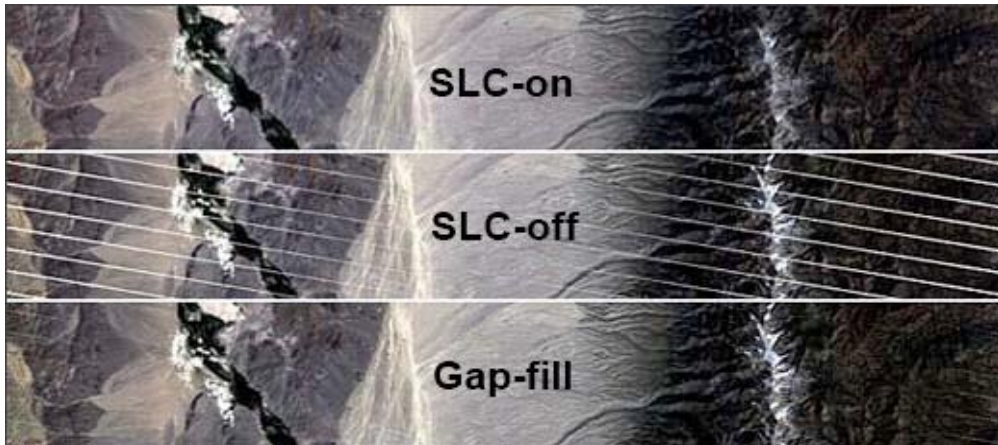


Figura 17. Ejemplo de imagen con sistema SLC funcionando correctamente, SLC deshabilitado e imagen corregida. Fuente: USGS, Landsat 7 Science Data Users Handbook, 2019.

Una vez rellenados los espacios vacíos de la imagen, se realizó la conversión de números digitales a valores reales de radiancia. Este proceso se realizó con ayuda del plugin *Semi-Automatic Classification (SCP)* del software *QGIS*, mediante la siguiente ecuación:

$$L_{\lambda} = \left(\frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{Q_{calmax} - Q_{calmin}} \right) (Q_{cal} - Q_{calmin}) + LMIN_{\lambda}$$

Donde:

L_{λ} = Radiancia espectral en la apertura del sensor ($W/(m^2 sr \mu m)$)

Q_{cal} = Valor del píxel (*ND*)

Q_{calmin} = Valor mínimo del píxel (*ND*)

Q_{calmax} = Valor máximo del píxel (*ND*)

$LMIN_{\lambda}$ = Radiancia mínima relacionada a los números digitales ($W/(m^2 sr \mu m)$)

$LMAX_{\lambda}$ = Radiancia máxima relacionada a los números digitales ($W/(m^2 sr \mu m)$)

La aplicación de la ecuación transforma los números digitales de la imagen a valores de radiancia en la apertura del sensor. Estos nuevos valores de radiancia todavía necesitan ser procesados para obtener la reflectancia aparente, que se obtiene por medio de la siguiente ecuación:

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi L_{\lambda} d^2}{ESUN_{\lambda} \cos\theta_s}$$

Donde:

ρ_{λ} = Reflectancia sobre la atmósfera (*unidades*)

π = Constante matemática igual a 3.14159 (*unidades*)

L_{λ} = Radiancia espectral en la apertura del sensor ($W/(m^2 sr \mu m)$)

d = Distancia entre la tierra y sol (*unidades astronómicas*)

$ESUN_{\lambda}$ = Irradiación exoatmosférica solar promedio ($W/(m^2 \mu m)$)

θ_{λ} = Ángulo del cenit solar (*Grados*)

4.3.3 Corrección atmosférica

Una vez obtenidos los valores de reflectancia aparente, se procedió a eliminar la interferencia que produce la atmósfera a la energía que recibe el sensor, para obtener la reflectancia real. La corrección se realizó por medio del plugin *SCP* del software *QGIS* y el software *ENVI*. Los métodos para realizar la corrección atmosférica fueron *DOS 1* y *FLAASH*, para las imágenes *Landsat 7* y *RapidEye* respectivamente, los cuales toman la información necesaria de los metadatos de la imagen para el proceso.

4.3.4 Recorte área de estudio

En este paso se procedió a recortar el área de estudio para reducir el trabajo de cómputo y las complicaciones en el procesado de las imágenes. El corte se realizó con la capa creada previamente para delimitar el área de estudio.

4.4 Procesamiento de imágenes satelitales

Una vez que la información ha sido corregida y recortada el área de estudio. Se inició el procesamiento de la información con la evaluación del estrés de la vegetación mediante el índice de vegetación de diferencia normalizada *NDVI*.

4.4.1 Evaluación del estrés de la vegetación

La evaluación del estrés de la vegetación se realizó mediante la aplicación del índice *NDVI*, el cual usa las bandas espectrales del infrarrojo y rojo para identificar la vegetación saludable y estresada. Dentro de *QGIS* se procedió a realizar el cálculo de *NDVI* mediante el álgebra de mapas, aplicando la siguiente ecuación:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Donde:

NIR = Banda del infrarrojo cercano

RED = Banda del rojo

4.4.2 Cambio de uso del suelo

Para realizar la clasificación supervisada de las imágenes, solo se utilizó la zona A de la zona de estudio. Debido a que las imágenes disponibles para los años 2011, 2012 y 2019, únicamente cubren esta zona. Las clases que se definieron para realizar la clasificación fueron: cuerpos de agua, cultivos, lirio acuático, nubes, pastizales, suelo con poca vegetación, suelo desnudo, vegetación boscosa y zona urbana, que sirvieron para crear las zonas de entrenamiento para la clasificación de máxima verosimilitud. Las zonas de entrenamiento se eligieron con ayuda de imágenes satelitales de *Google Earth*, *RapidEye* en color real y en falso color infrarrojo.

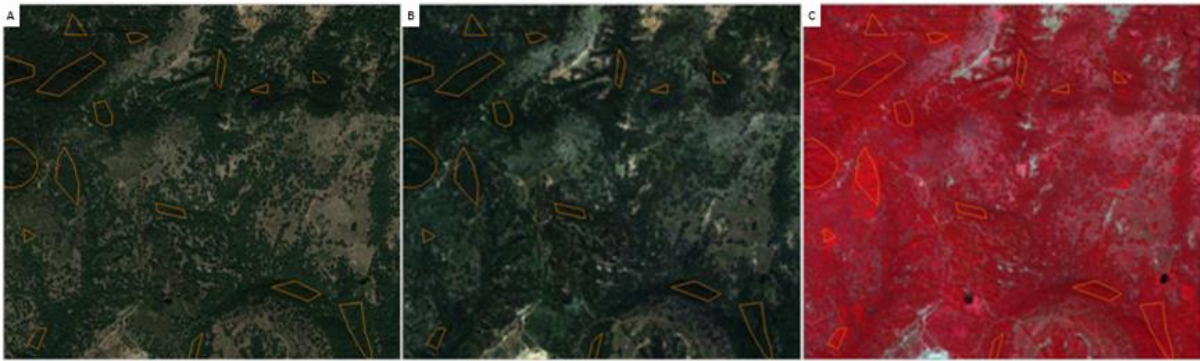


Figura 18. A) Imagen satelital de Google Earth. B) Imagen RapidEye en color real. C) Imagen en falso color.

Las zonas de entrenamiento se eligieron de acuerdo con su respuesta espectral, buscando principalmente un comportamiento de campana para cada zona. Una vez definidas las zonas para las 8 clases, se procedió a realizar la clasificación de máxima verosimilitud en el software *SNAP 8.0*.

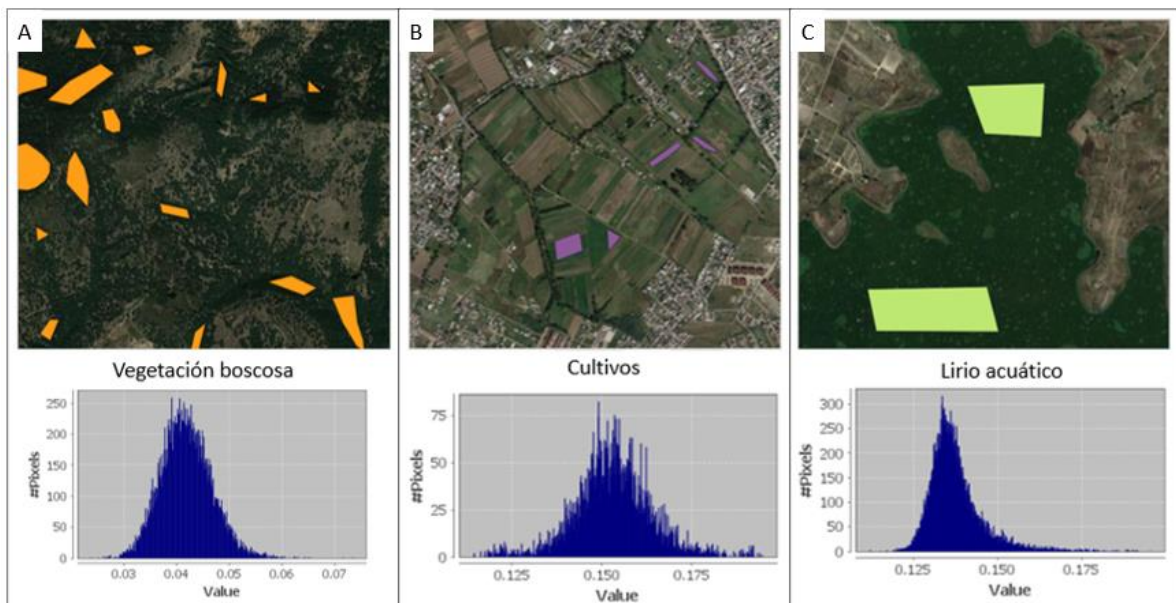


Figura 19. Ejemplos de zonas de entrenamiento. A) Vegetación boscosa. B) Cultivos. C) Lirio acuático.

4.4.3 Estimación de la temperatura superficial del suelo

El cálculo de la temperatura superficial del suelo se obtuvo mediante la aplicación del método umbrales *NDVI* visto en Sobrino J. A. *et al.*, (2004). El proceso para obtener la emisividad y la temperatura de superficie se muestra en el diagrama siguiente.

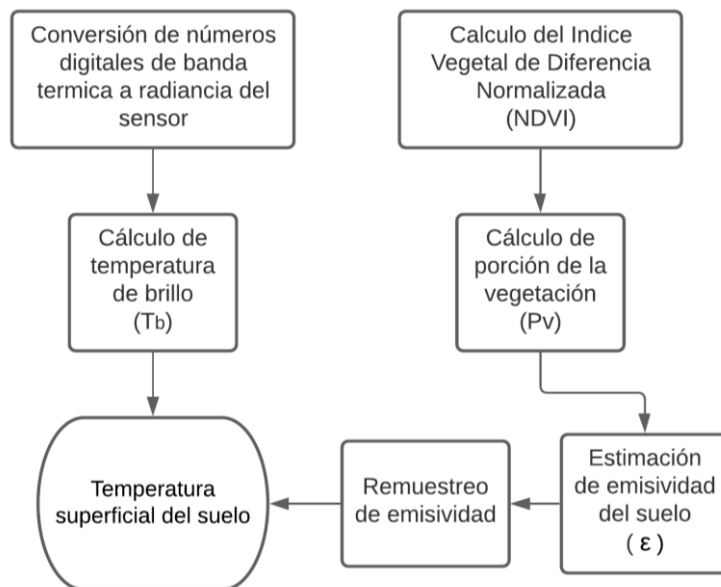


Figura 20. Procesos para el cálculo de la temperatura superficial del suelo.

Con base en los pasos planteados para obtener la temperatura de superficie, primero se realizó la conversión de números digitales a radiancia en la apertura del sensor de la banda térmica de *Landsat 7*. Esta conversión ya se había realizado durante el preprocesamiento de las imágenes. Por lo que se continuó con el cálculo de la temperatura de brillo con el plugin *SCP* de *QGIS*, mediante la siguiente ecuación:

$$T_b = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda + 1}\right)}$$

Donde:

T_b = Temperatura de brillo (*Grados K*)

K_1 = 666.09 ($W/(m^2 sr \mu m)$)

K_2 = 1282.71 (*Grados K*)

L_λ = Radiancia espectral en la apertura del sensor de la banda térmica ($W/(m^2 sr \mu m)$)

Una vez calculada la temperatura de brillo del sensor, se necesita el índice *NDVI* para las mismas fechas que las bandas térmicas. Esto se realizó fácilmente utilizando las bandas del rojo e infrarrojo de las imágenes de *Landsat 7*.

El paso siguiente para obtener la temperatura de superficie, es el cálculo de la porción de vegetación. Esta se obtuvo con base en el *NDVI* realizado previamente en la siguiente ecuación:

$$P_v = \left(\frac{NDVI - NDVI_s}{NDVI_v - NDVI_s} \right)^2$$

Donde:

P_v = Porción de la vegetación

$NDVI$ = Índice vegetal de diferencia normalizada

$NDVI_v$ = Valor de *NDVI* correspondiente a la vegetación

$NDVI_s$ = Valor de *NDVI* correspondiente al suelo desnudo

Ya calculado el índice *NDVI* y la porción de la vegetación, se aplicó el método de umbrales *NDVI*, visto en Sobrino J. A. *et al.*, (2004). Este método considera a la superficie del suelo en tres clases diferentes; suelo cubierto de vegetación, suelo desnudo y suelo mixto. Donde se le asigna una emisividad a cada una de las clases, de acuerdo con los valores del *NDVI*. De manera que valores mayores a 0.5, corresponden a suelo cubierto con vegetación, al que se le asigna una emisividad de 0.99. Para valores menores a 0.2 del *NDVI*, se asigna una emisividad de 0.97.

Por último, para los valores entre 0.2 y 0.5 del *NDVI* se le considera como una combinación de suelo desnudo y vegetación, al que se le asigna una emisividad de acuerdo con la siguiente ecuación.

$$\varepsilon = (\varepsilon_v - \varepsilon_s - (1 - \varepsilon_s)F\varepsilon_v)P_v + (\varepsilon_v + (1 - \varepsilon_s)F\varepsilon_v)$$

Donde:

ε_v = Emisividad de la vegetación

ε_s = Emisividad del suelo desnudo

F = 0.55

P_v = Porción de vegetación

Resumiendo, la ecuación a la siguiente expresión:

$$\varepsilon = 0.004P_v + 0.986$$

Obtenida la emisividad de superficie para cada una de las clases de suelo, se realizó un remuestreo a la imagen resultante para cambiar la resolución del píxel a 60 m, para que el resultado final mantuviera coherencia con la emisividad de superficie y la resolución de las bandas térmicas de *Landsat 7*. Por último, se utilizaron los productos de temperatura de brillo y la emisividad para obtener la temperatura superficial del suelo, mediante la siguiente ecuación:

$$T_{sup} = \frac{T_b}{1 + \left(\frac{\lambda T_b}{\rho}\right) \ln(\varepsilon)} - 273.15$$

Donde:

T_{sup} = Temperatura superficial del suelo

T_b = Temperatura de brillo

λ = Longitud de onda de radiancia emitida

ρ = 1.438×10^{-2} (mK)

ε = Emisividad de la superficie del suelo

4.4.4 Evaluación de la calidad del aire

La evaluación de la calidad del aire se realizó con ayuda de las imágenes de *Sentinel 5p*, correspondientes a la columna del metano. Para la descarga y procesamiento de las imágenes se utilizó la plataforma de *Google Earth Engine*

(GEE), que facilita el acceso y manipulación de la información espacial, ya que cuenta con códigos de libre acceso que cualquier persona puede usar para realizar sus propios análisis.

Dentro de GEE, se especificó la colección y el tipo de variable disponible en la plataforma de Sentinel 5p. Además, se definió un filtro temporal para indicar solo las fechas de interés para el estudio y se definió el área, para que, al exportar las imágenes, solo se guardará la zona de interés.

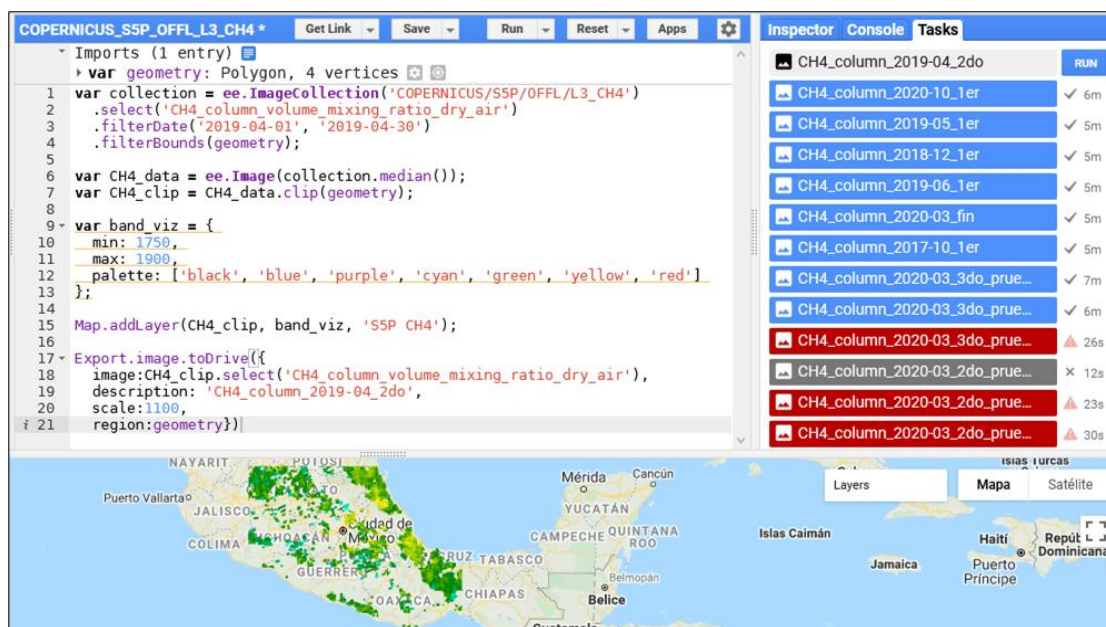


Figura 21. Script para el procesado y descarga de datos Sentinel 5p.

Para la evaluación de la calidad del aire se hizo una homologación de los valores, para que todas las imágenes de metano tuvieran el mismo rango de valores. Los valores de cada imagen se dividieron en 5 rangos, de acuerdo con los valores mínimos y máximos en cada una de ellas. Una vez definidos los rangos se reclasificaron las imágenes por medio del álgebra de mapas, siendo el número 5, el valor para el rango más alto de metano y 1 para el rango más bajo.

Tabla 3. Rangos de concentración de metano para homologación de imágenes Sentinel 5p.

Imágenes Sentinel 5p											
Rangos	CH4_column_2020-10	CH4_column_2020-03	CH4_column_2019-06	CH4_column_2019-05	CH4_column_2019-04	CH4_column_2018-12					
1	<=1864.7	<=1815.4	<=1833.2	<=1845.8	<=1844.9	<=1868.2					
2	>1864.7 <=1879.7	>1815.4 <=1837.4	>1833.2 <=1843.8	>1845.8 <=1855.5	>1844.9 <=1857.1	>1868.2 <=1873.1					
3	>1879.7 <=1894.8	>1837.4 <=1859.5	>1843.8 <=1854.4	>1855.5 <=1865.2	>1857.1 <=1869.3	>1873.1 <=1878					
4	>1894.8 <=1909.8	>1859.5 <=1881.5	>1854.4 <=1865	>1865.2 <=1874.9	>1869.3 <=1881.5	>1878 <=1882.9					
5	>1909.8	>1881.5	>1865	>1874.9	>1881.5	>1882.9					

Una vez reclasificadas las imágenes, se procedió a obtener la concentración media de gas metano para la zona de estudio mediante la ecuación:

$$CH_{4_{zona}} = \frac{\sum_i^n X_i}{n}$$

Donde:

$CH_{4_{zona}}$ = Concentración media de metano

X = Imágenes satelitales

i = Fecha de imagen satelital

n = Total de imágenes

4.4.5 Análisis estadísticos de variables ambientales.

El análisis estadístico de las variables ambientales se realizó usando el software R. En el cual, se aplicó el análisis de componentes principales (ACP) y una regresión lineal con la información de las variables medidas en los sitios ubicados con RS, para conocer las características de las variables ambientales en los sitios y la relación de las variables dentro las diferentes zonas donde se concentran los sitios con RS.

4.4.5.1 Análisis de componentes principales

La aplicación del ACP se hizo con dos tipos de mediciones, la primera con la media de las mediciones totales de los años 2011, 2012 y 2019, y la segunda con la media de las mediciones de 2019. Esto se hizo, para observar las diferencias que pudieran presentarse en el comportamiento de los sitios con RS durante los tres años y el año más reciente.

Para realizar el primer análisis, fue necesario homologar las mediciones de las variables de vegetación y temperatura superficial en 5 clases, para esto se buscaron los valores mínimos y máximos en cada año de las variables, para reclasificar las imágenes de acuerdo con los rangos que se presentan a continuación. Esto se realizó para obtener homologado el comportamiento promedio de las variables.

Tabla 4. Rangos para la homologación de los valores NDVI.

Rangos	Imágenes NDVI					
	NDVI 2011		NDVI 2012		NDVI 2019	
1	≥ 0.592		≥ 0.580		≥ 0.497	
2	< 0.592	≥ 0.391	< 0.580	≥ 0.381	< 0.497	≥ 0.332
3	< 0.391	≥ 0.188	< 0.381	≥ 0.182	< 0.332	≥ 0.168
4	< 0.188	≥ -0.014	< 0.182	≥ -0.015	< 0.168	≥ 0.003
5	< -0.014		< -0.015		< 0.003	

Tabla 5. Rangos para la homologación de los valores de temperatura de superficie.

Rangos	Imágenes temperatura superficial					
	LST 2011		LST 2012		LST 2019	
1	≤ 22.34		≤ 16.88		≤ 27.98	
2	> 22.34	≤ 26.38	> 16.88	≤ 21.93	> 27.98	≤ 32.93
3	> 26.38	≤ 30.41	> 21.93	≤ 26.98	> 32.93	≤ 37.89
4	> 30.41	≤ 34.45	> 26.98	≤ 32.03	> 37.89	≤ 42.84
5	> 34.45		> 32.03		> 42.84	

Por último, se procedió a obtener la media de los tres años para las variables de vegetación y temperatura, por medio del álgebra de mapas utilizando la ecuación:

$$\frac{\sum_i^n X_i}{n}$$

Donde:

X = Imagen satelital

i = Fecha de imagen

n = Total de imágenes

En el caso del segundo ACP, los datos que se utilizaron no fueron homologados y solo se obtuvo la media de las variables, para cada uno de los 15 grupos que componen los sitios ubicados con RS.

Antes de aplicar el ACP en ambos casos, se revisaron los datos para asegurarse que todas las variables fueran valores numéricos. Una vez revisada la información se procedió a normalizar los datos, para que se pudieran comparar en una misma escala de valores los resultados de los dos análisis. La normalización se realizó usando la siguiente ecuación:

$$Norm_{Dat} = \frac{x - \bar{x}}{\sigma}$$

Donde:

$Norm_{Dat}$ = Datos normalizados

x = Datos

\bar{x} = Media de los datos

σ = Desviación estándar

Una vez que las variables se normalizaron, se aplicó el ACP y posteriormente se revisó la desviación estándar, porción de varianza y varianza acumulada de las componentes creadas. Esto permitió elegir a las componentes que mejor explican el total de la información, y se pudiera descartar las componentes que no aportan a la explicación de los datos. Por último, se realizó una regresión lineal entre las variables originales y las componentes seleccionadas, para identificar qué componentes describen mejor a las variables originales.

4.4.5.2 Regresión lineal de variables ambientales y mapa de densidad de sitios

Para realizar la regresión lineal solo se usaron las variables medidas del año 2019 en cada una de las diferentes zonas del mapa de densidades. Para realizar la regresión lineal, como primer paso se separó el mapa de densidad en 5 regiones y para cada región se realizó un mallado de 750 x 750 m. Esto se realizó para extraer por recuadro la media de los valores en cada una de las variables. La extracción de

la información se realizó con la herramienta de estadísticas zonales de la caja de procesos de QGIS.

La información extraída de cada una de las regiones se exportó en formato CSV, para su procesamiento y análisis en R, donde se importaron los datos y se inició la regresión lineal de las variables.

Capítulo 5: Resultados

La búsqueda cartográfica manual de los sitios con RS mal gestionados, el procesamiento de las imágenes satelitales y la correlación de las variables ambientales medidas en los sitios ubicados en la ciudad de Puebla se muestran a continuación.

5.1 Cartografía manual de los sitios

La búsqueda manual de los sitios con presencia de RS mal gestionados en el área de estudio dio un total de 1671 sitios, de los cuales solo se tomaron en cuenta los sitios que tuvieran un área mayor a $100m^2$, por lo que estos fueron descartados. Después del filtrado, el conteo de sitios dio un total de 792, los cuales se agruparon en 15 clases diferentes, de acuerdo con su área (figura 22).

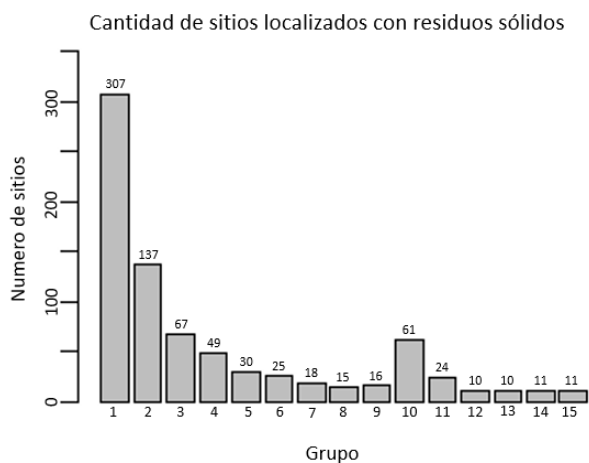


Tabla 6. Grupos para los diferentes sitios con presencia de residuos sólidos.

Grupo	Área (m^2)	Cantidad	Grupo	Área (m^2)	Cantidad
1	< 200	307	9	900 - 1000	16
2	200 - 300	137	10	1000 - 2000	61
3	300 - 400	67	11	2000 - 3000	24
4	400 - 500	49	12	3000 - 4000	10
5	500 - 600	30	13	4000 - 5000	11
6	600 - 700	25	14	5000 - 10000	11
7	700 - 800	18	15	> 10000	11
8	800 - 900	15	Total		792

Figura 22. Cantidad de sitios localizados en el área de estudio, agrupados en 15 clases.

Los sitios que fueron mapeados en este trabajo son lugares que presentan RS mal gestionados y se encuentran dispersos a lo largo de toda la ciudad, cubriendo principalmente la zona norte y sur que corresponde a las zonas industriales y las que están más alejadas al centro de la ciudad. Es necesario comentar que por limitaciones del estudio se tomó mayor importancia a la periferia de la ciudad durante la búsqueda de los sitios, por lo tanto, pueden existir más sitios en la parte central de la ciudad. La imagen siguiente muestra la ubicación de los sitios con RS dentro del área de estudio para la ciudad de Puebla.

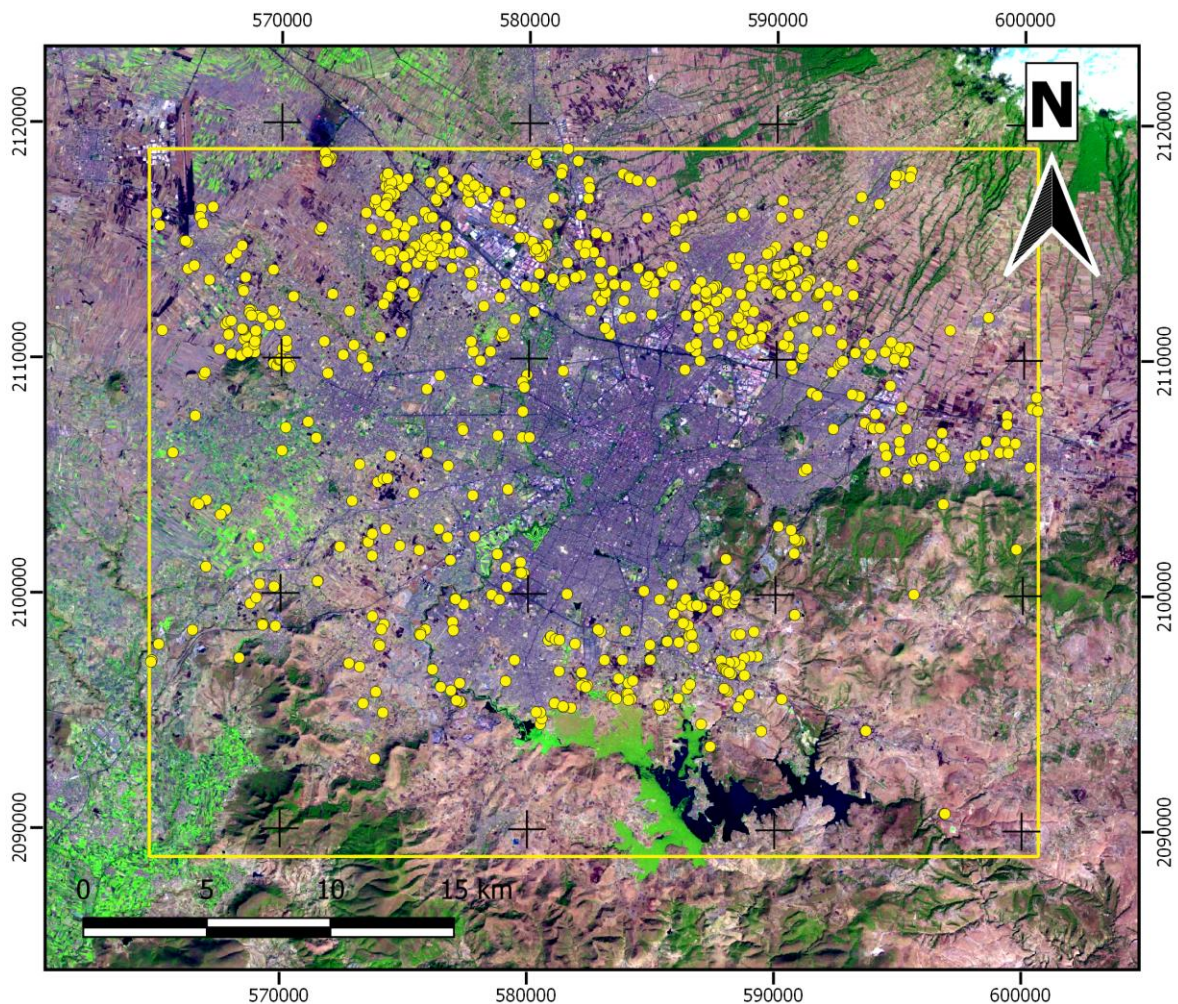


Figura 23. Imagen satelital con sitios ubicados con RS en la ciudad de Puebla.

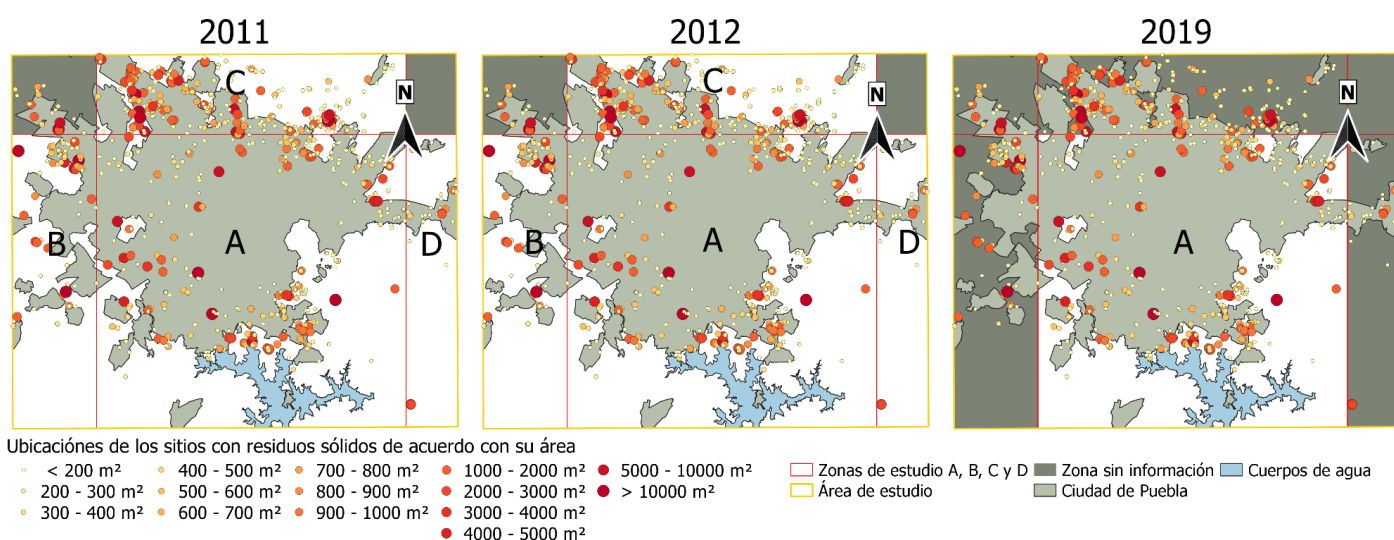


Figura 24. Sitios con RS y área de estudio dividida por zonas A, B, C y D.

El área de estudio se dividió en cuatro zonas (A, B, C y D), para evaluar mejor las características de los sitios con presencia de RS. Debido a que la extensión del área de estudio requirió diversas imágenes satelitales, las cuales tienen diferentes fechas de captura. Las zonas que dividen el área de estudio y la cantidad de sitios encontrados por zona se presentan a continuación:

La división del área de estudio por zonas se realizó con base en las fechas y disponibilidad de las imágenes satelitales. La zona A, es la única que se cubre en los 3 años estudiados y por lo tanto es la que fue utilizada en todos los análisis del trabajo. Las diversas zonas en las que se dividió el área de estudio contienen diferentes cantidades de sitios, lo cuales se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 7. Sitios ubicados en cada una de las zonas del área de estudio.

Zona	Área mínima	Área máxima	Área total	Cantidad de sitios
A	100.21	348,266	621,648	348
B	105.84	33,440	105,269	79
C	100.19	24,103	283,448	313
D	104.52	4,558	17,686.76	32

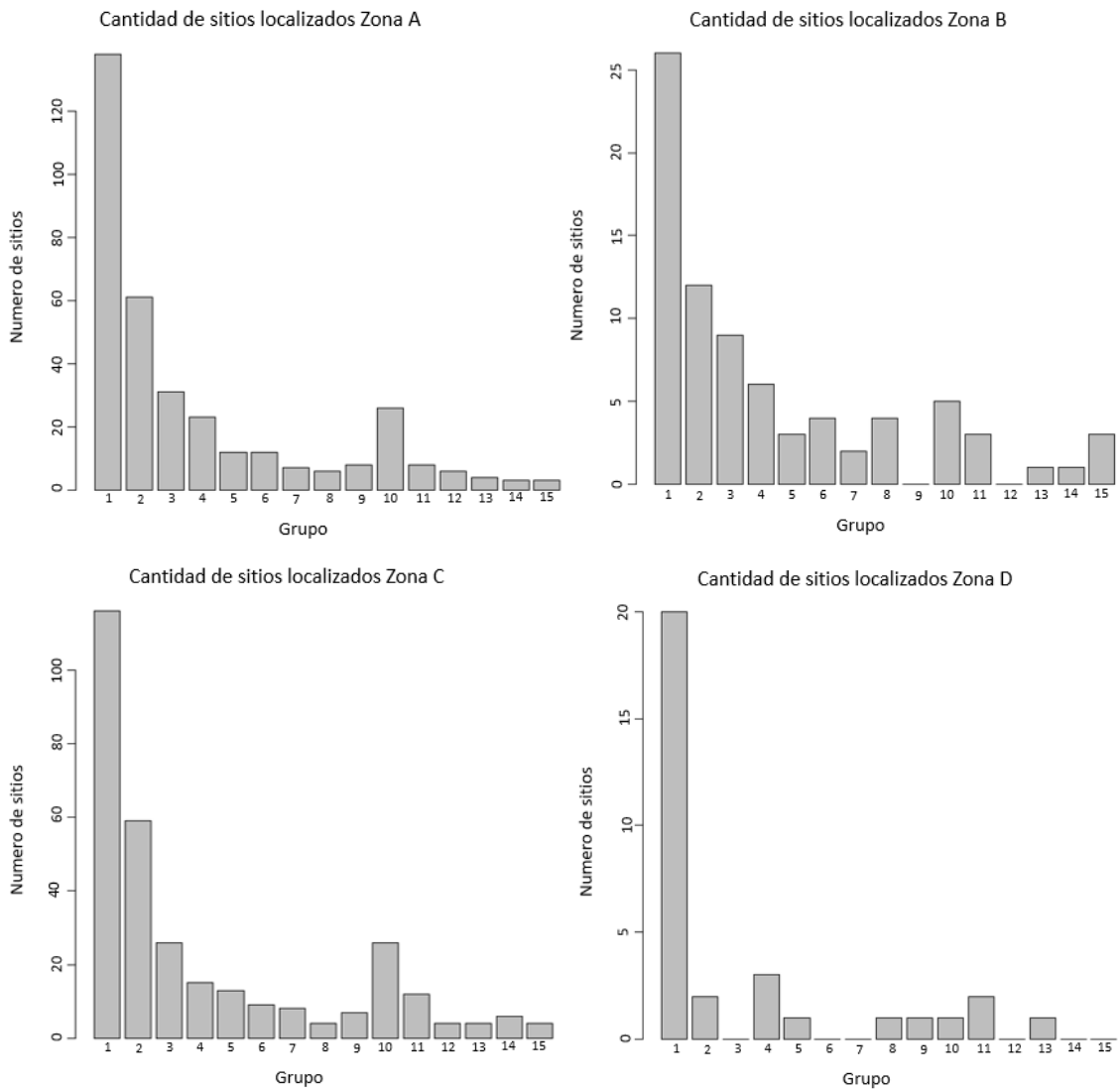


Figura 25. Cantidad de sitios con presencia de residuos sólidos en zonas A, B, C y D.

Mapa de densidad

La metodología para generar el mapa de densidades se aplicó a los sitios con RS ubicados dentro de la zona A del área de estudio, debido a que en esta zona se tiene información para los tres años de estudio. El mapa resultante muestra las zonas con mayor densidad de sitios con presencia de RS, en donde se pueden observar dos grupos de color rojo, al noreste y al sur de la zona A, que indican las áreas con mayor concentración de sitios.

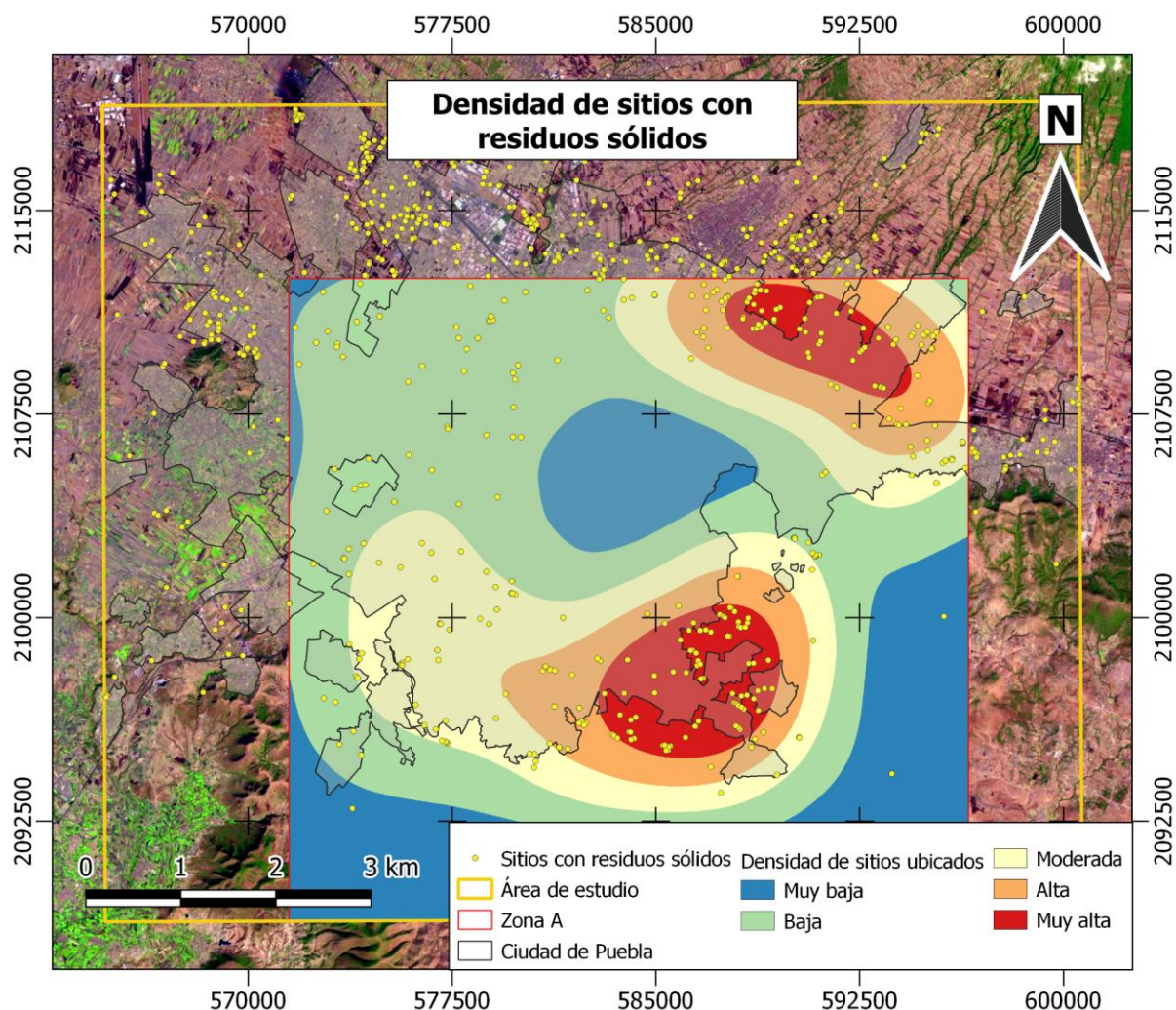


Figura 26. Mapa de densidad de las ubicaciones de los sitios ubicados con RS mal gestionados en la zona A, de la ciudad de Puebla.

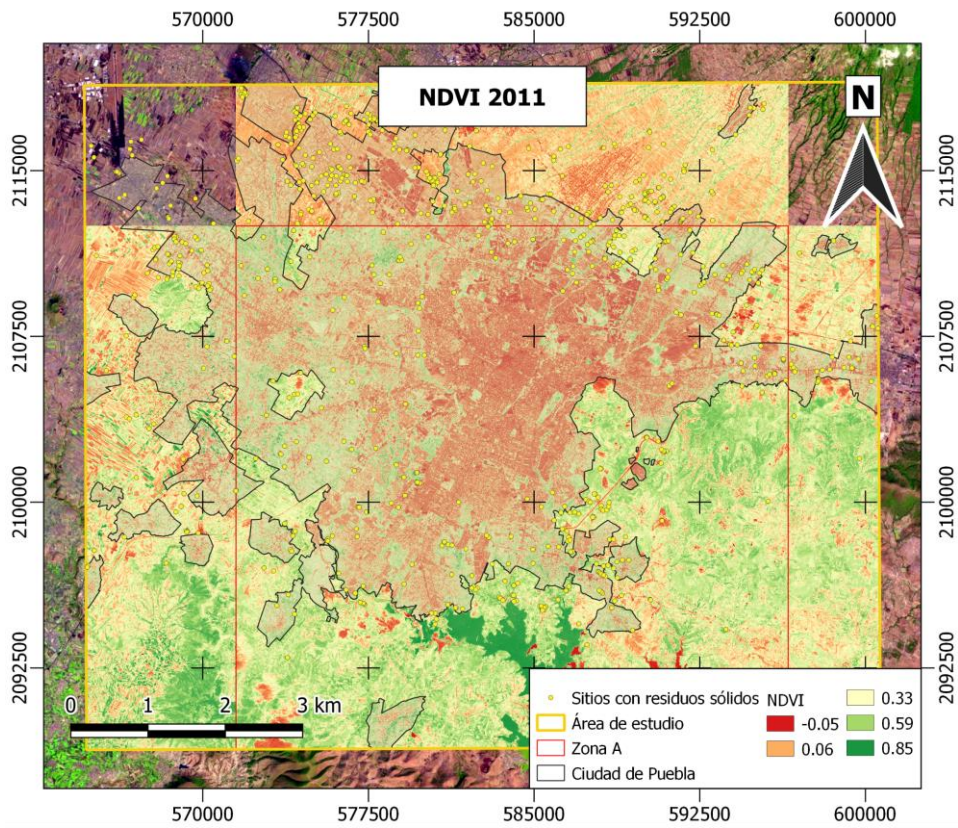
5.2 Evaluación del estrés de la vegetación

La evaluación del estrés de la vegetación para los años de 2011, 2012 y 2019, se realizó mediante la aplicación del índice *NDVI* a las imágenes satelitales *RapidEye*. Los resultados del *NDVI* para los años 2011 y 2012, corresponden a un mosaico de imágenes satelitales, con distintas fechas de captura. Las fechas de las imágenes utilizadas para el *NDVI* se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 8. Fechas de imágenes satelitales utilizadas para NDVI y su zona correspondiente.

Zona	2011	2012	2019
A	05-oct	27-jul	27-may
B	28-oct	22-jul	Sin datos
C	11-jun	28-may	
D	05-oct	21-oct	

Los resultados del cálculo del NDVI para los años 2011, 2012 y 2019 se muestran a continuación.



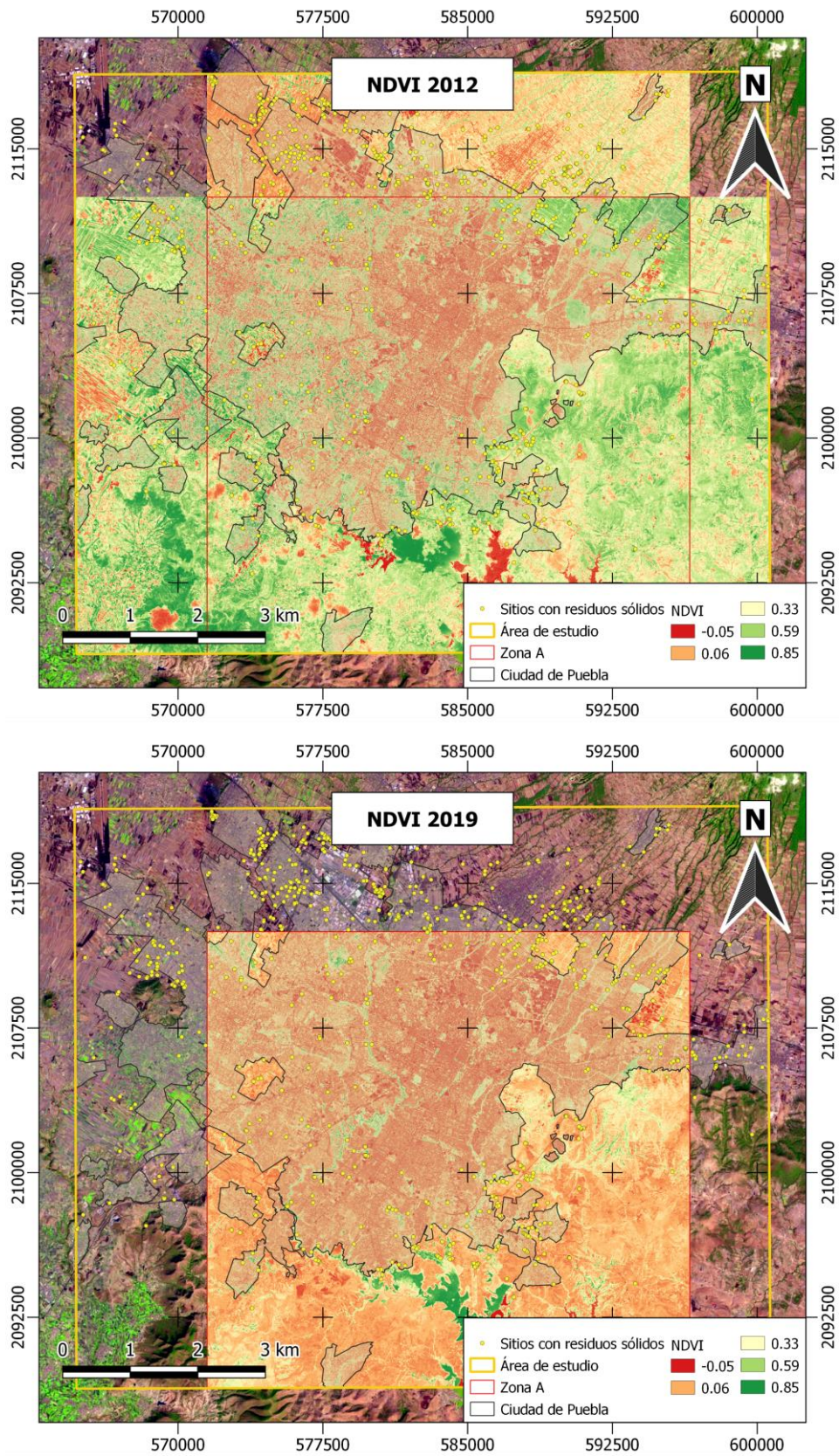


Figura 27. Mapas NDVI de la zona de estudio para los años 2011, 2012 y 2019.

Zona A

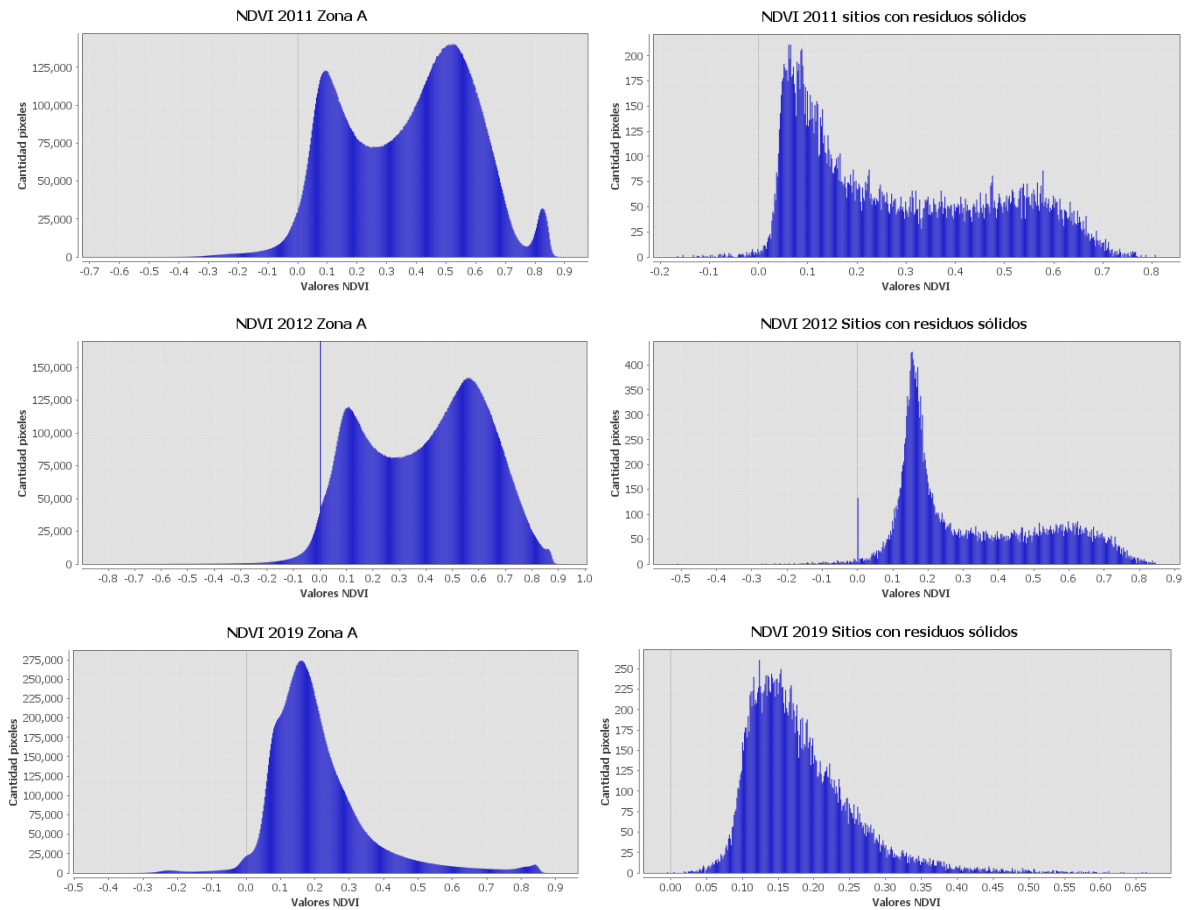


Figura 28. Histogramas del NDVI correspondiente a zona A, y de los sitios con RS en zona A para 2011, 2012 y 2019.

Los resultados de la evaluación de la vegetación para toda la zona A en 2011 presentan tres grandes picos en 0.1, 0.55 y 0.82. Los valores del primer pico, se asocia a sitios sin presencia de vegetación, como: suelo desnudo, suelo con muy poca vegetación y zonas urbanas. Para los valores del segundo pico, se asocia principalmente a la combinación de vegetación sana, suelo desnudo y con poca vegetación. En el último pico, los valores altos mostrados en el *NDVI* se asocian a la vegetación sana o muy densa existente en toda la zona A. Para el año 2012 se presenta un comportamiento similar al año 2011, con la excepción que no presenta el tercer pico asociado a la vegetación sana o muy densa. Para el año 2019, se muestra un pico principal entre 0.1 y 0.2, que es similar a los que se presentan en los años

anteriores, que está asociado al suelo desnudo, suelo con muy poca vegetación y zona urbana.

El comportamiento de los sitios ubicados con RS en 2011 dentro de la zona A, muestra un pico principal entre los valores de 0.05 y 0.2, que se relaciona con áreas con suelo desnudo, suelo con muy poca vegetación y zona urbana. Además, se observa que en los sitios con RS también se ubican en áreas que van desde una vegetación escasa a vegetación saludable, ya que su histograma muestra valores mayores a 0.2 y menores a 0.7, pero en menor medida que el primer pico. Para el año 2012 los sitios con RS presentan valores similares al año 2011, principalmente en un pico entre los valores 0.1 y 0.25, y la presencia de los sitios sobre vegetación escasa hasta vegetación densa. Por último, en el año 2019 se muestra un gran pico principal dentro de los valores de 0.1 y 0.2, que igual a los años 2011 y 2012, se relaciona con la presencia de suelo desnudo, suelo con muy poca vegetación y zona urbana, además, de presentar una muy reducida cantidad de vegetación densa para los sitios en este año.

En general, los sitios con RS presentaron un comportamiento de suelo desnudo, muy poca vegetación y zona urbana, pero en la mayoría de los sitios se puede asociar la respuesta del NDVI a un comportamiento de suelo desnudo. Para comprobar que dichos sitios corresponden a las zonas mencionadas, se realizó una segmentación del índice *NDVI* usando los rangos que presentan los picos en el histograma y se verificaron los segmentos creados en la imagen original.

La primera segmentación se hizo para los valores menores a 0.24 en el *NDVI*, para identificar las zonas que corresponden a suelo desnudo, suelo con muy poca vegetación y zona urbana. La segmentación del segundo pico se realizó para los valores entre 0.24 a 0.75, que corresponden a la combinación de la vegetación escasa a vegetación densa. Por último, la segmentación del *NDVI* para los valores mayores a 0.75, resaltó pocos sitios con presencia de vegetación muy densa. Dicha vegetación corresponde al lirio acuático y algunos cultivos dispersos en toda la ciudad. En la siguiente imagen se muestran resaltados en color rojo los elementos correspondientes a las tres segmentaciones de los valores *NDVI*.

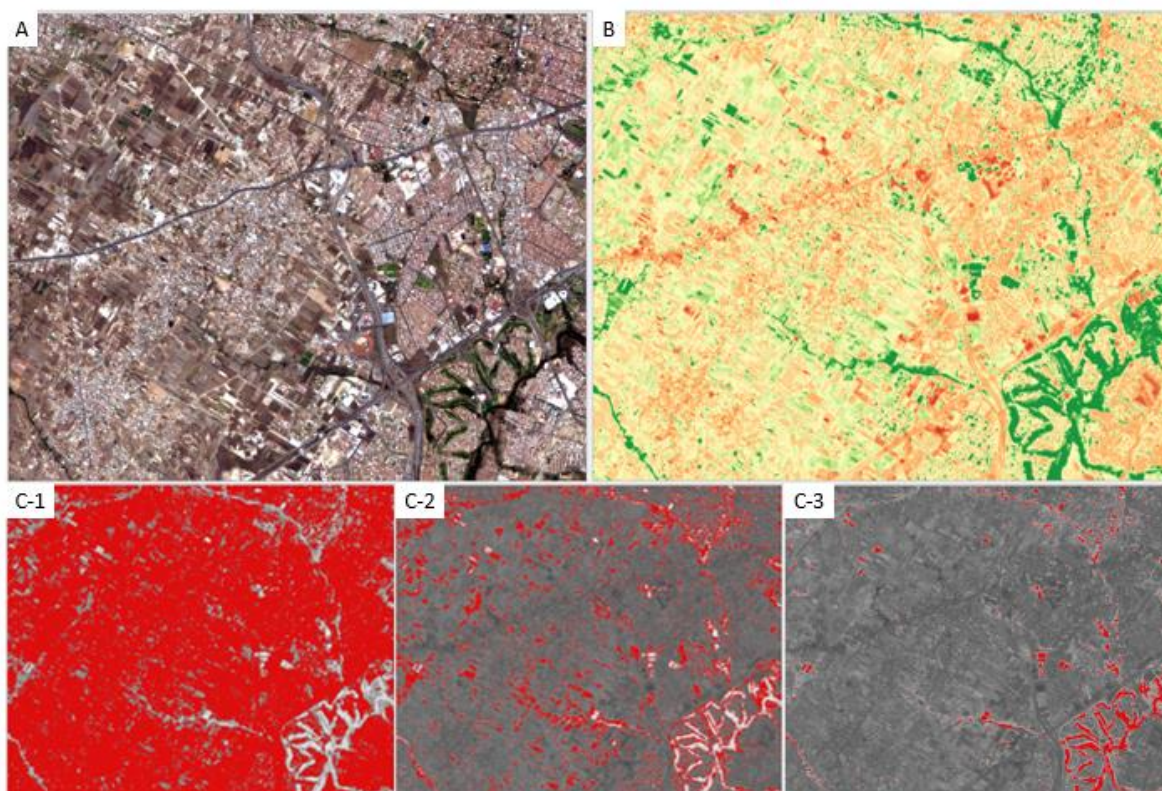


Figura 29. A) Imagen satelital original en color natural. B) NDVI creado de la imagen original. C-1) Segmento del NDVI menor a 0.24. C-2) Segmento del NDVI entre 0.24 y 0.75. C-3) Segmento del NDVI mayor a 0.75.

Zona B

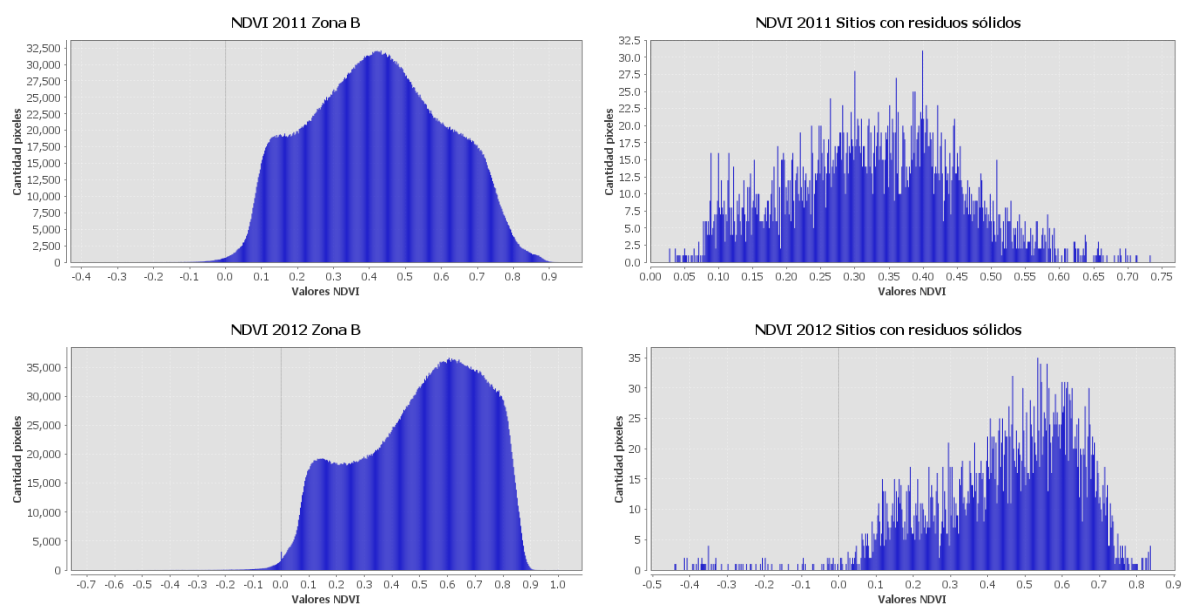


Figura 30. Histogramas del NDVI correspondiente a (izquierda) la totalidad de la zona B, y (derecha) delimitando únicamente los sitios con RS en zona B. Resultados para las imágenes de 2011 y 2012.

La evaluación del estrés de la vegetación para toda la zona B en 2011 muestra tres picos, el primero entre 0.05 y 0.2, el segundo siendo el principal pico con los valores de 0.3 a 0.6, y el tercero con los valores de 0.65 a 0.8. El pico principal está asociado a zonas con presencia de suelo con poca vegetación hasta vegetación densa. Para el año 2012 la respuesta del NDVI muestra un gran pico entre los valores de 0.5 y 0.8, asociado principalmente a zonas con vegetación densa a vegetación muy densa.

Los resultados del NDVI en los sitios encontrados con RS para la zona B en 2011, muestra que dichos sitios se encuentran principalmente sobre áreas con poca vegetación hasta áreas con vegetación, ya que los valores del NDVI se encuentran entre 0.25 y 0.5. Durante el año 2012, los valores del NDVI en donde se ubican los sitios con RS se encuentran principalmente entre 0.4 y 0.7, que correspondería a zonas con vegetación moderada a vegetación densa.

Zona C

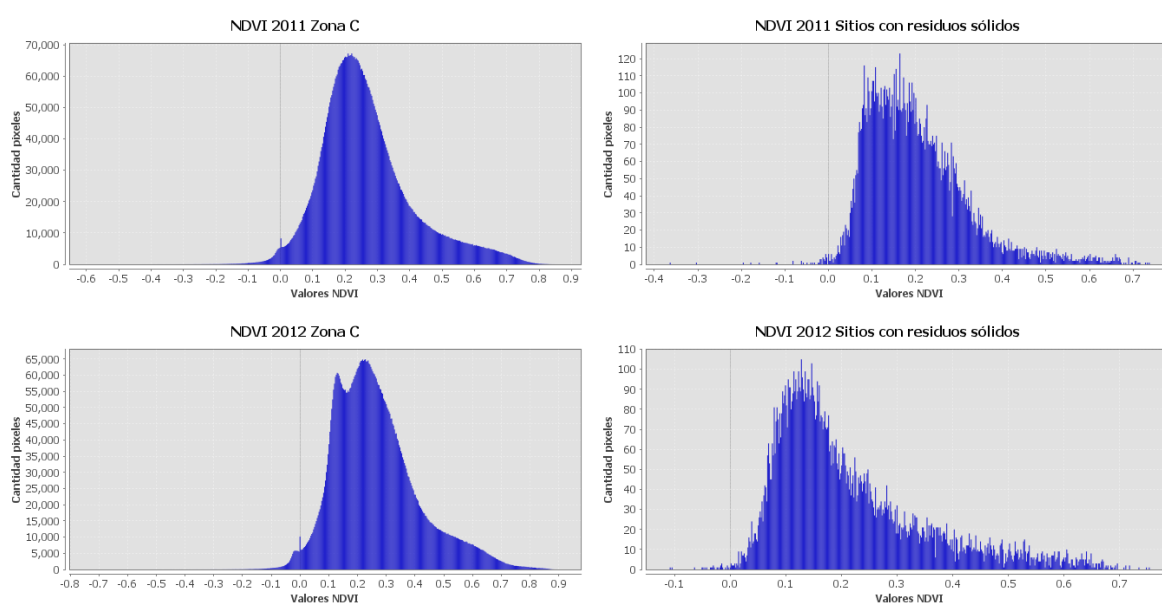


Figura 31. Histogramas del NDVI correspondiente a (izquierda) la totalidad de la zona C, y (derecha) delimitando únicamente los sitios con RS en zona C para 2011 y 2019.

Los resultados de la evaluación del *NDVI* para la zona C durante 2011, muestra un pico principal de los valores entre 0.1 a 0.4, que está asociado a zonas con suelo desnudo y vegetación escasa. Además, se aprecian valores escasos mayores de 0.4, lo que indica una poca presencia de vegetación moderada a densa. Para el año 2012, los valores del *NDVI* muestran un comportamiento similar al 2011, mostrando los valores del pico entre 0.1 y 0.4, y pocos valores mayores a 0.4 asociados a suelo desnudo y vegetación escasa para el primer pico y vegetación moderada a densa para los valores mayores 0.4.

Los resultados con respecto a los sitios con presencia de RS en la zona muestran que la mayoría de los sitios se encuentran principalmente entre los valores de 0.05 y 0.3, que está relacionado con suelo desnudo, zona urbana y suelo con vegetación muy escasa. Además, se muestra que, dentro de los sitios con RS, hay presencia de vegetación moderada a densa en muy pocas cantidades.

Zona D

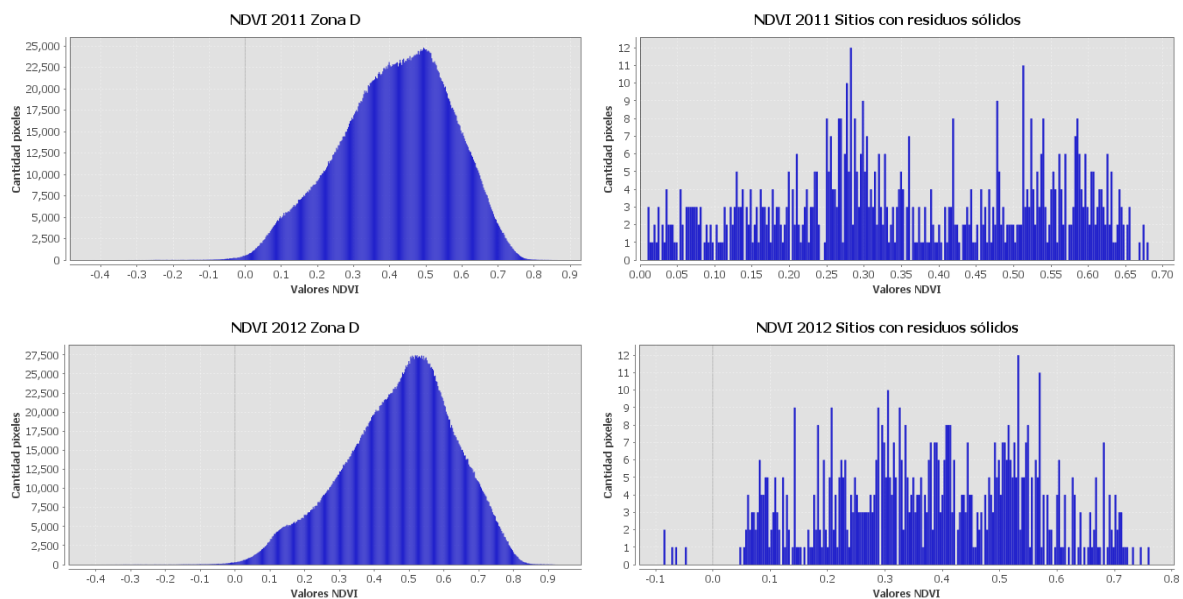


Figura 32. Histogramas del *NDVI* correspondiente a (izquierda) la totalidad de la zona D, y (derecha) delimitando únicamente los sitios con RS en zona D. Resultados para las imágenes de 2011 y 2012.

La evaluación del estrés de la vegetación para los años 2011 y 2012 en la zona D, mostró que predomina la vegetación moderada, con presencia de áreas con escasa vegetación y vegetación densa. Además, destaca la poca presencia de zonas urbanas y suelos completamente desnudos en ambos años.

Los sitios con presencia de RS en la zona D, muestran en los histogramas una distribución irregular a lo largo de todos los valores, lo que indica que, en esta zona, hay una presencia de varios estados de la vegetación, como: suelo desnudo, vegetación escasa, vegetación moderada y vegetación densa. Lo único que resalta dentro del histograma son dos pequeños picos para 2011 entre los valores de 0.2 a 0.3, y 0.5 a 0.55, por lo que se puede decir que, para ese año, los sitios se encontraban sobre áreas con suelo desnudo con vegetación escasa y áreas con vegetación moderada.

5.3 Cambio de uso del suelo

Tipos de uso de suelo en 2011

Los resultados de la clasificación supervisada de máxima verosimilitud en 2011, mostró que los tipos de suelo dominantes en los grupos del 1 al 13 fueron: Pastizales, suelo desnudo, zona urbana y cultivos. Para los grupos 14 y 15, los principales tipos de suelo fueron: zona urbana, suelo desnudo, pastizales y cultivos. Siendo en total, los tipos de suelo más representativos en todos los grupos la zona urbana, el suelo desnudo, pastizales y cultivos.

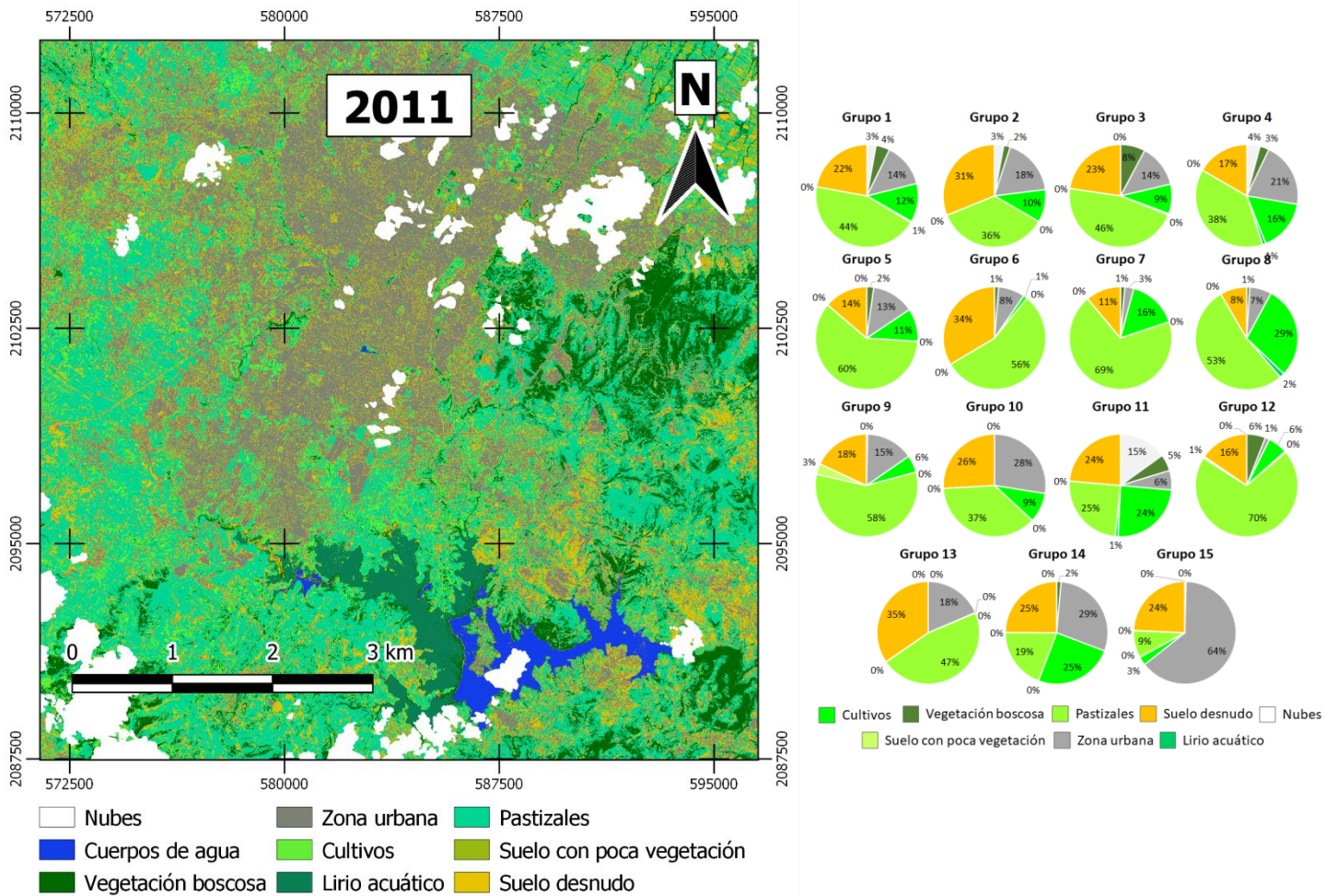


Figura 33. Resultados de la clasificación de uso de suelo en los sitios ubicados en la Zona A del año 2011.

Tabla 9. Cobertura de los tipos de suelos en los sitios identificados con RS en 2011.

Tipo de suelo	Zona urbana	Suelo desnudo	Pastizales	Cultivo	Vegetación boscosa	Nubes	Lirio acuático	Suelo poca vegetación
Área (m)	299304.34	148410.31	125699.61	37340.26	5325.90	4524.75	603.49	438.93

Tipos de uso de suelo 2012

Para el año 2012, la clasificación del tipo de suelo en los sitios con RS mostró un gran aumento de la zona urbana y una reducción de los demás tipos de suelo en todos los grupos, principalmente reduciéndose el suelo desnudo y pastizales. Además, el tipo

de suelo con poca vegetación se incrementó en la mayoría de los grupos, mostrándose como el tercer tipo de suelo dominante en los sitios con RS.

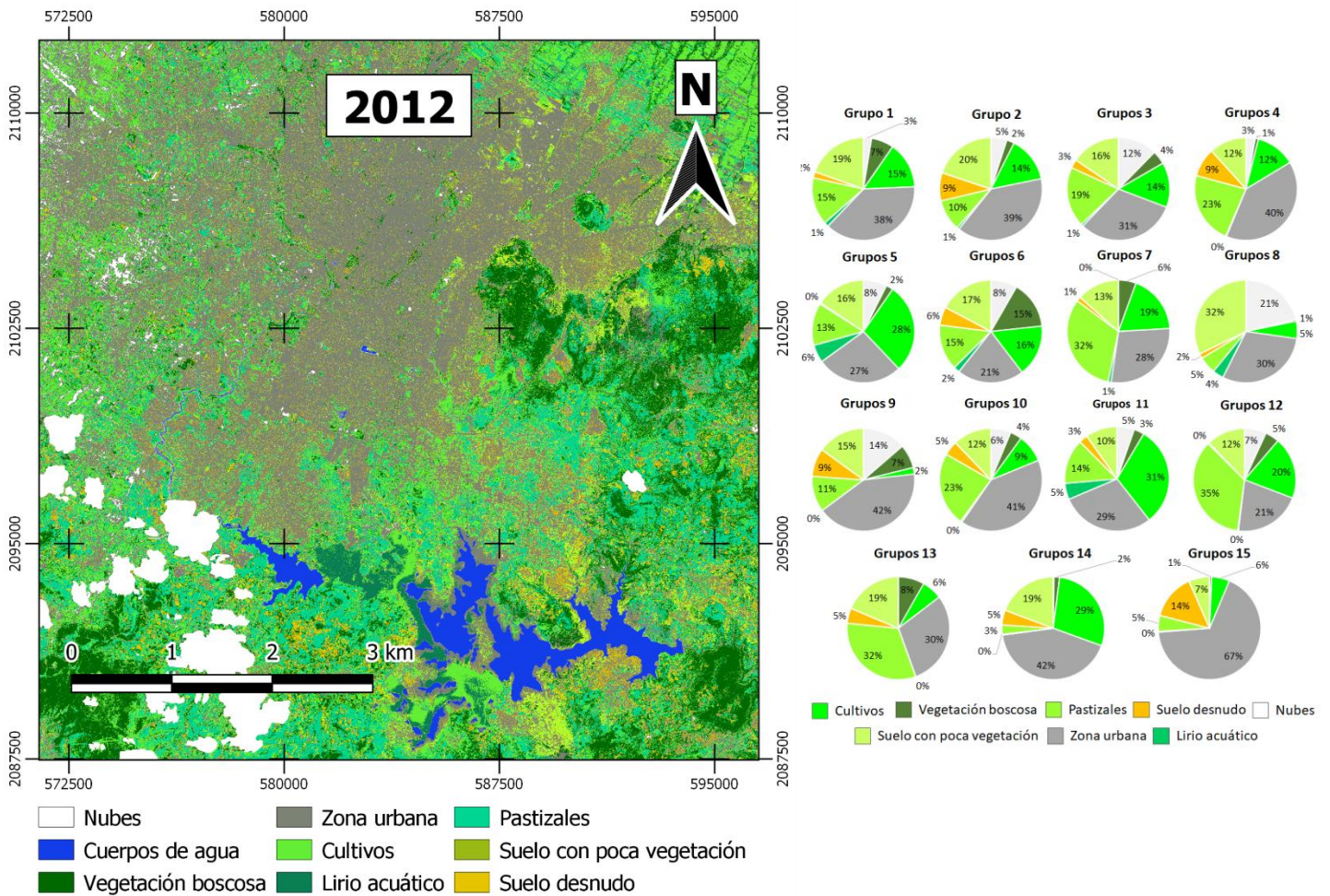


Figura 34. Resultados de la clasificación de uso de suelo obtenidas sobre la Zona A del año 2012.

Tabla 10. Cobertura de suelos en los sitios identificados con RS en 2012.

Tipo de suelo	Zona urbana	Suelo desnudo	Suelo poca vegetación	Pastizales	Cultivo	Vegetación boscosa	Nubes	Lirio acuático
Área (m)	348587.46	66854.44	61097.32	59756.42	58467.72	13597.78	10988.25	2298.20

Tipos de uso del suelo en 2019

Para 2019, la clasificación del tipo de suelo en los sitios con RS en la ciudad de Puebla demostró un gran aumento en las clases de suelo desnudo y suelo con poca vegetación los cuales predominan en todos los grupos. Además, se observa que la zona urbana también incrementó en todos los grupos, principalmente en los más pequeños, en los cuales este tipo de suelo no era tan representativo, y se redujeron los demás tipos de suelo en todos los grupos para este año

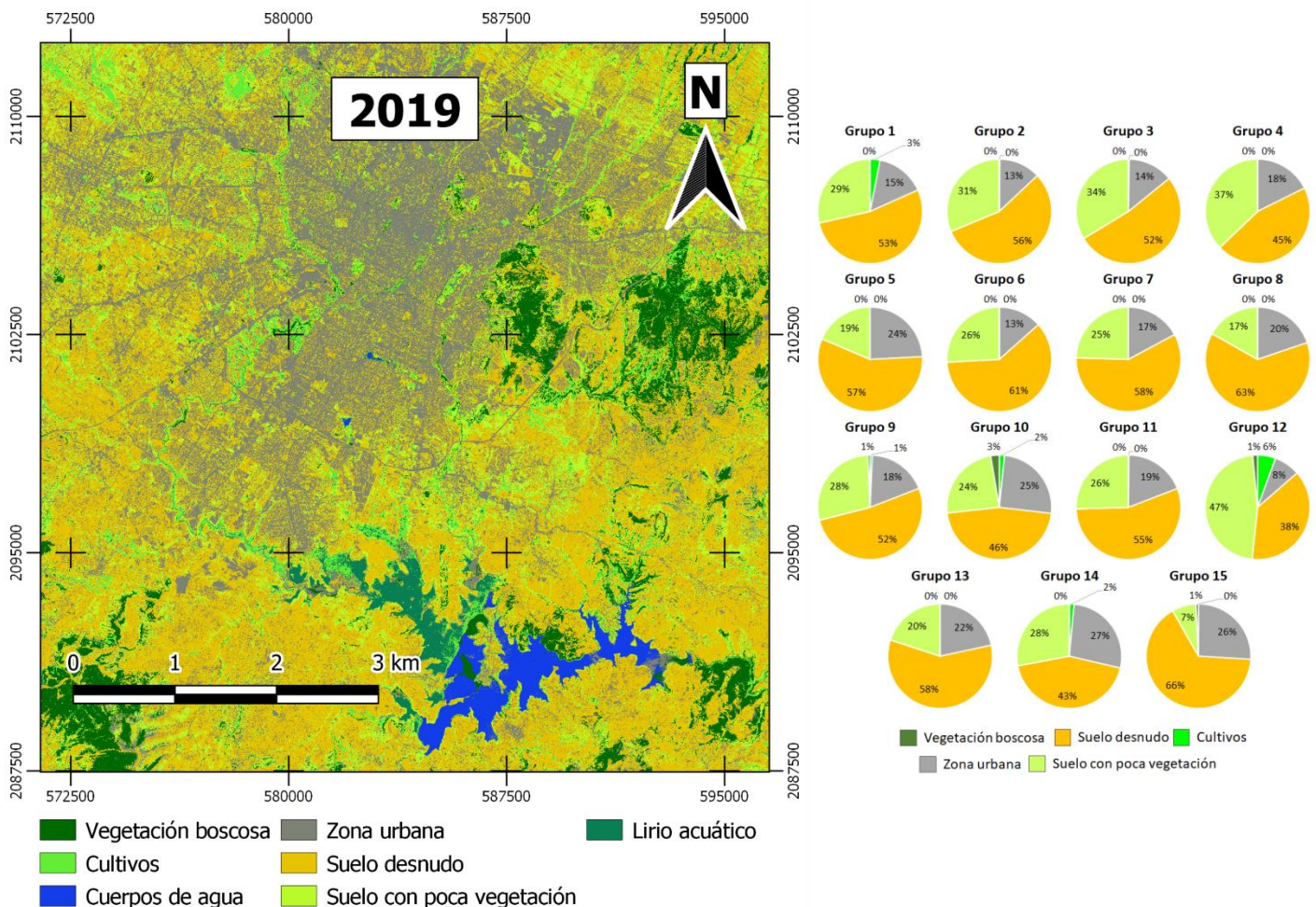


Figura 35. Resultados de la clasificación de uso de suelo obtenidas sobre la Zona A del año 2019.

Tabla 11. Cobertura de suelos en los sitios identificados con RS en 2019.

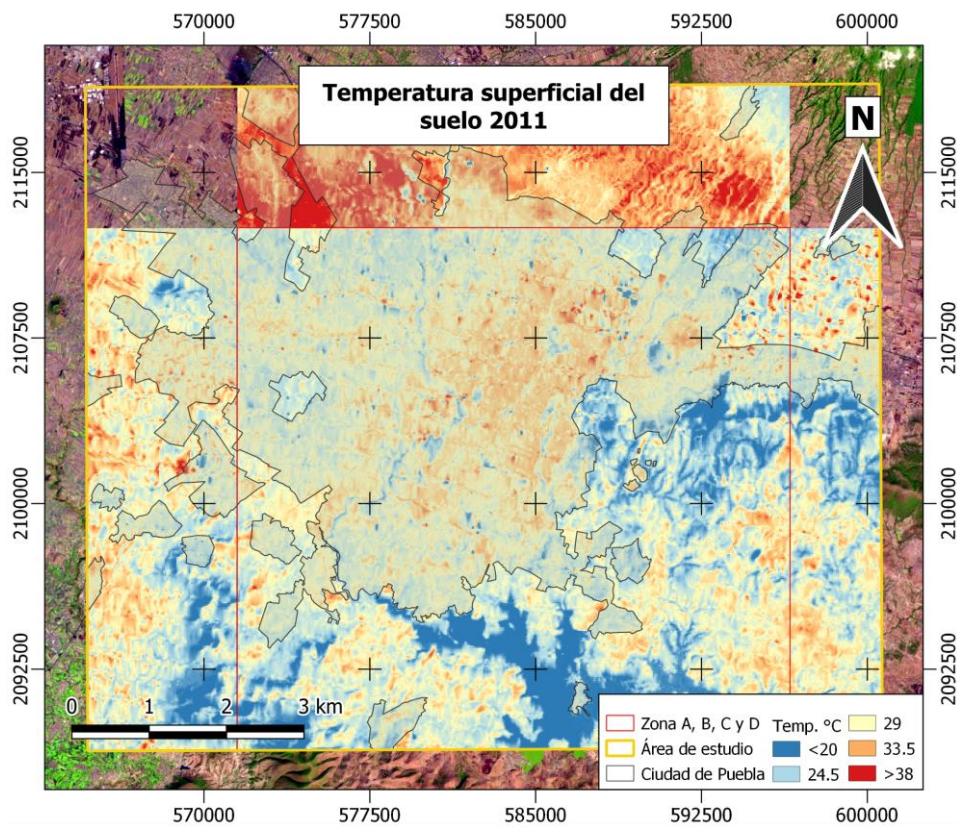
Tipo de suelo	Suelo desnudo	Zona urbana	Suelo poca vegetación	Vegetación boscosa	Cultivo	Pastizales	Nubes	Lirio acuático
Área (m)	377962.32	146710.71	88306.28	5556.15	3112.13	0.00	0.00	0.00

5.4 Estimación de la temperatura superficial del suelo

El cálculo de la temperatura superficial del suelo para los años 2011, 2012 y 2019, se realizó con imágenes satelitales de *Landsat 7*. Los resultados de las mediciones se muestran para cada una de las zonas que dividen el área de estudio. Las fechas de las imágenes utilizadas en cada zona se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 12. Fechas de imágenes satelitales utilizadas para el cálculo de la temperatura superficial del suelo y su zona correspondiente.

Zona	2011	2012	2019
A	octubre	julio-agosto	mayo
B			
C	mayo	mayo	Sin datos
D	octubre	octubre	



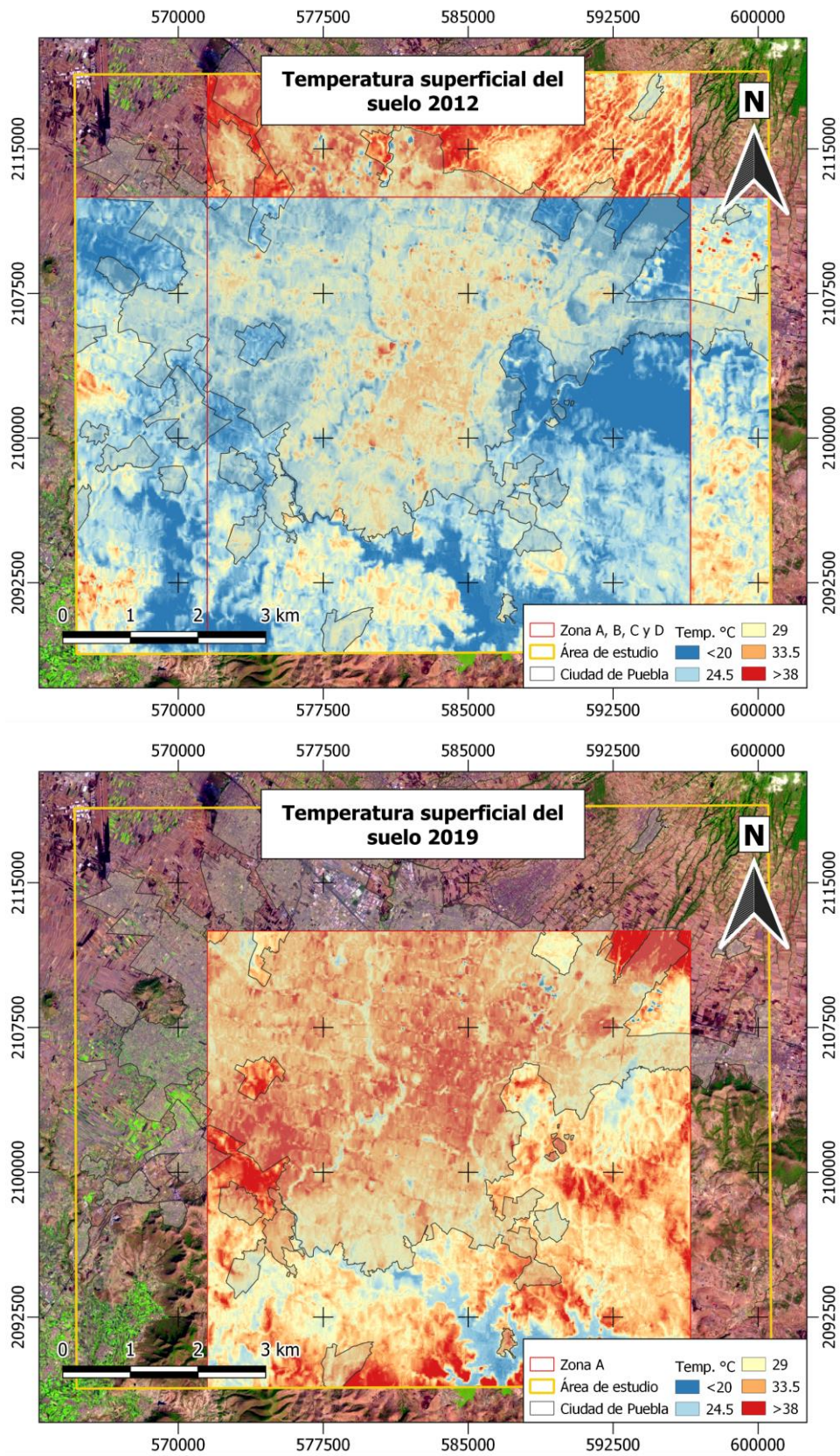


Figura 36. Mapas de temperatura superficial del suelo de la zona de estudio para los años 2011, 2012 y 2019.

Zona A

La temperatura superficial media dentro de la zona A en los años 2011, 2012 y 2019 fue de 27.31 °C, 25.02 °C y 32.32 °C respectivamente. Las variaciones en las temperaturas superficiales se deben a que las imágenes utilizadas para el cálculo de la temperatura son de fechas distintas. Dentro de la zona A, la cantidad de sitios localizados con RS que superan la temperatura media de la zona fue de 159 sitios de un total de 348. La cantidad de los sitios con RS con temperatura mayor a la media y de acuerdo con su área muestra que el grupo 1 presenta la mayor cantidad de sitios.

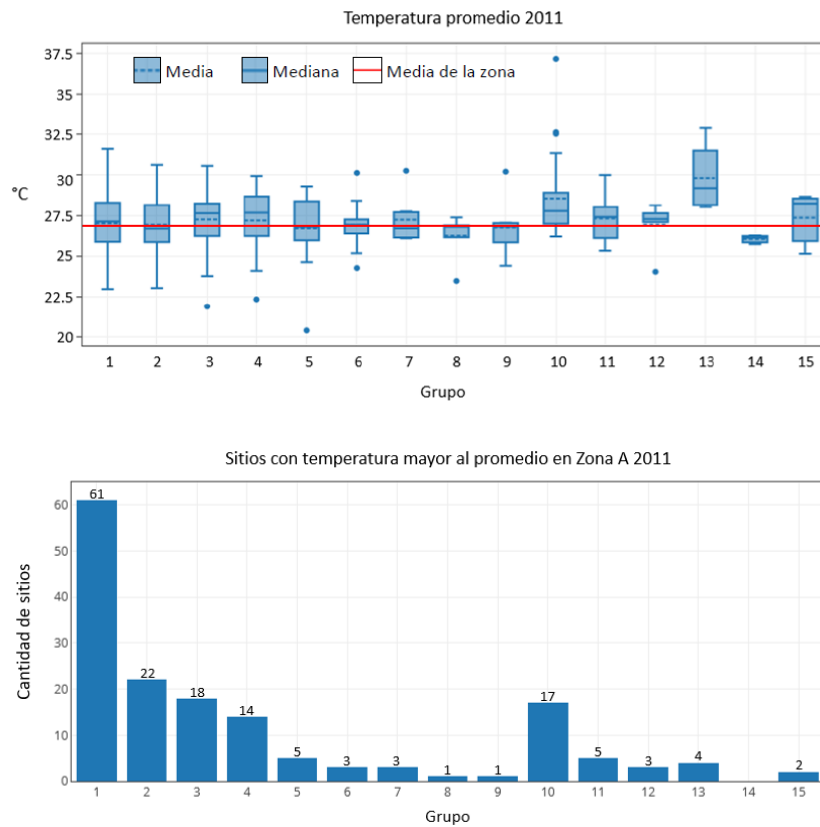


Figura 37. Temperaturas superficiales por grupo (arriba) y sitios con temperatura mayor a la media (abajo) en zona A 2011.

En 2012, la cantidad de sitios con RS que superan la temperatura media de la zona A, fue de 100 sitios. De igual forma se muestra que el grupo con la mayor cantidad de sitios que superan la temperatura media de la zona, se encuentran en el grupo 1.

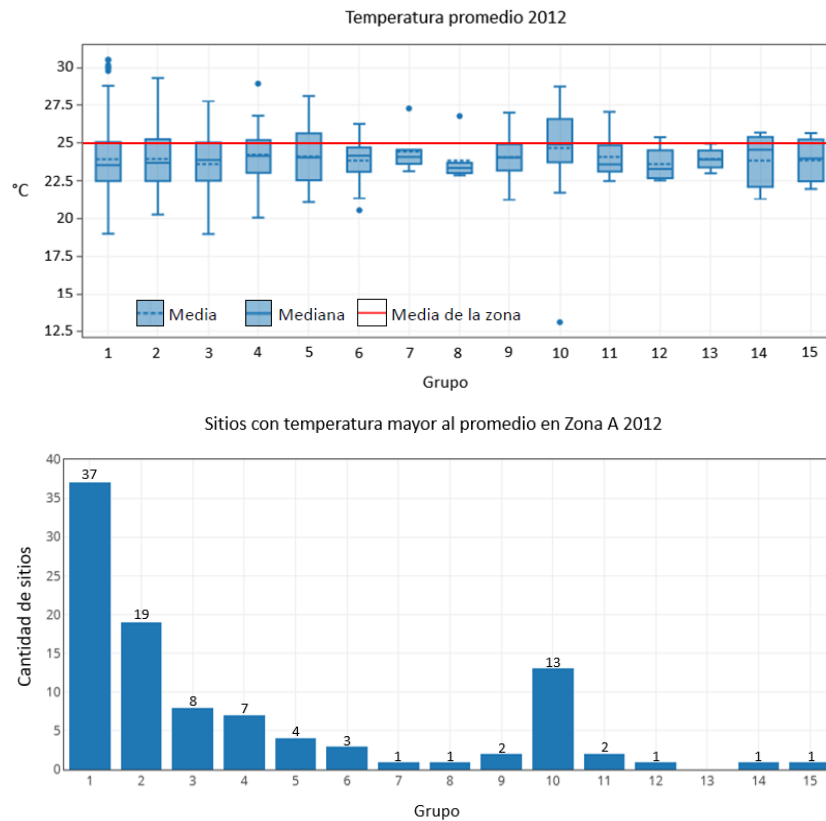
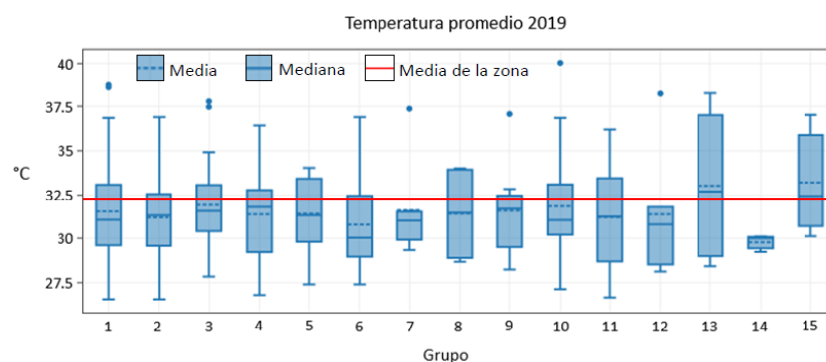


Figura 38. Temperaturas superficiales por grupo (arriba) y sitios con temperatura mayor a la media (abajo) en zona A 2012.

Para el año 2019, la cantidad de sitios que superan la temperatura media de la zona A fue de 111 sitios, donde la mayor parte de los sitios se encuentra dentro del grupo 1.



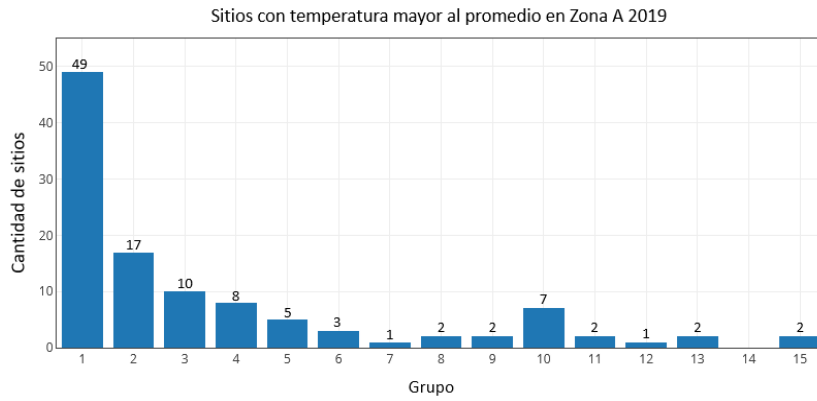
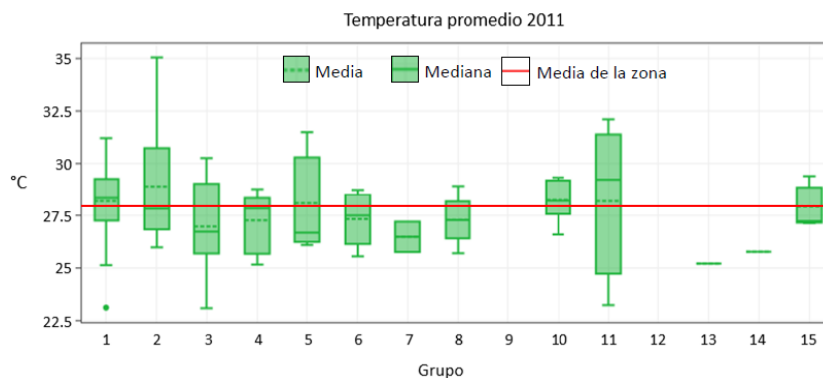


Figura 39. Temperaturas superficiales por grupo (arriba) y sitios con temperatura mayor a la media (abajo) en zona A 2019.

Zona B

Dentro de la zona B, la temperatura media para los años de 2011 y 2012, fue de 27.94 °C y 24.47 °C respectivamente. Para esta zona, las imágenes satelitales utilizadas para el cálculo de la temperatura corresponden al mes de octubre del 2011 y julio-agosto del 2012. Se puede apreciar que, en 2011, la temperatura de la zona fue más alta que en 2012.

Los sitios con presencia de RS para la zona B, que muestran una temperatura mayor a la media en 2011, fueron 36 de un total de 79 sitios. Los cuales presentan la mayor cantidad en el grupo 1, con 15 sitios.



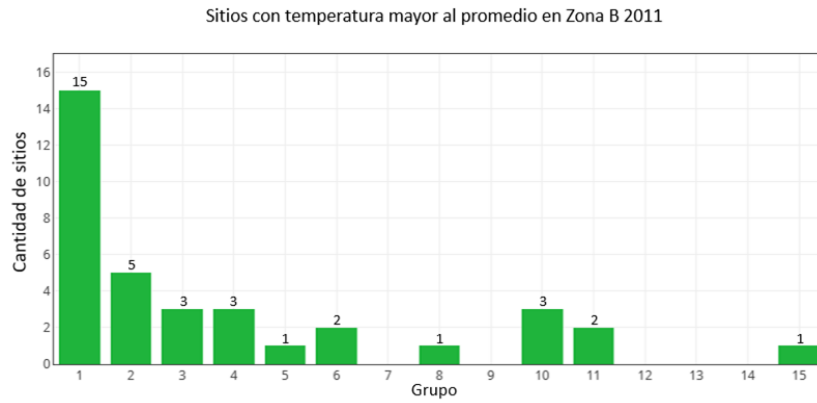


Figura 40. Temperaturas superficiales por grupo (arriba) y sitios con temperatura mayor a la media (abajo) en zona B 2011.

Para el año 2012 de la zona B, la cantidad de sitios con RS que superan la media general de la zona, es de 25. De los cuales se aprecia una notable disminución de la temperatura media.

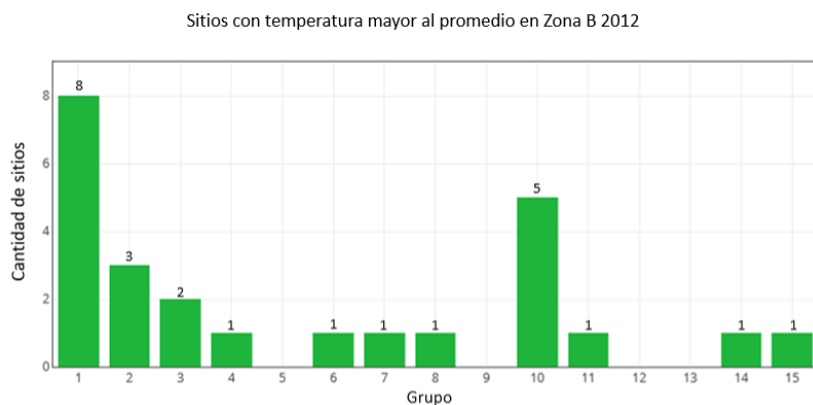
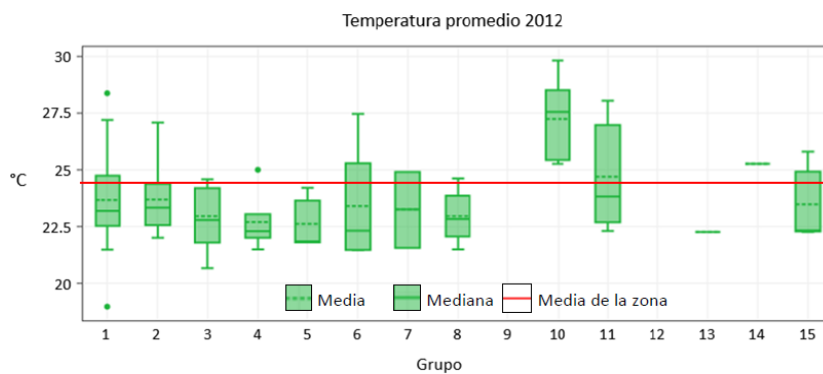


Figura 41. Temperaturas superficiales por grupo (arriba) y sitios con temperatura mayor a la media (abajo) en zona B 2012.

Zona C

La temperatura superficial media de la zona C, para los años 2011 y 2012 es de 33.34 °C y 39.11 °C respectivamente. Las fechas de las imágenes que se utilizaron para la zona C, corresponden al mes de mayo para ambos años. Se puede apreciar un aumento de la temperatura media para el año 2012 de más de 5 grados.

En la zona C, para el año 2011 la cantidad de sitios con presencia de RS que superan la media de la temperatura en toda la zona fue de 169, de un total de 313. Siendo el grupo 1 el que contiene la mayor cantidad, con un total de 58 sitios.

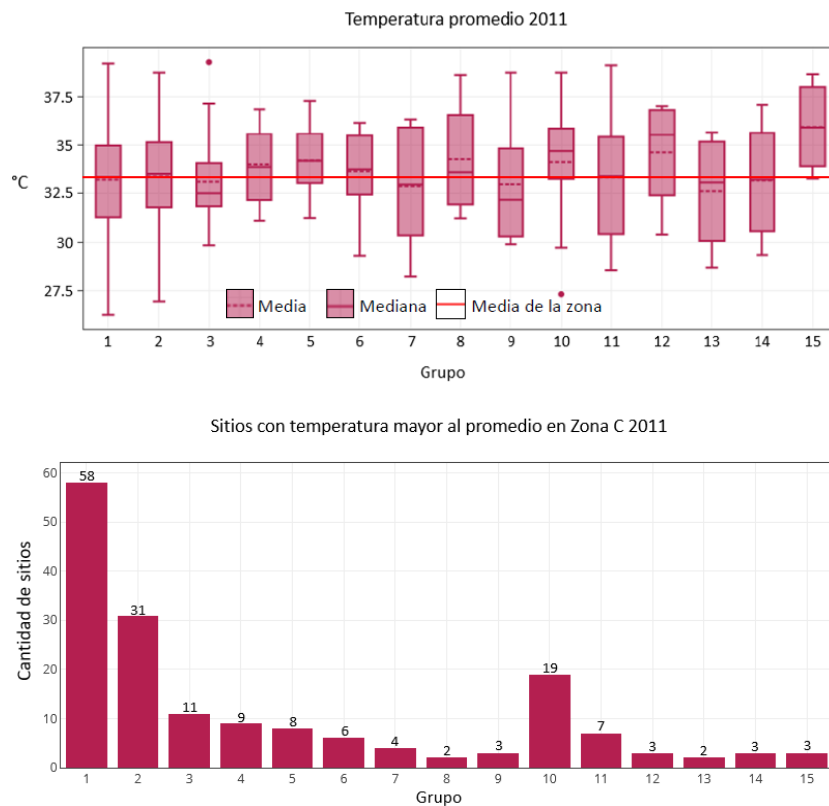


Figura 42. Temperaturas superficiales por grupo (arriba) y sitios con temperatura mayor a la media (abajo) en zona C 2011.

Para el año 2012, los sitios con presencia de RS que superan la media de temperatura fue la cantidad de 165 sitios, que se asemeja al del 2011. Para este año, el grupo que contiene mayor cantidad de sitios fue el grupo 1, con una cantidad de 61 sitios.

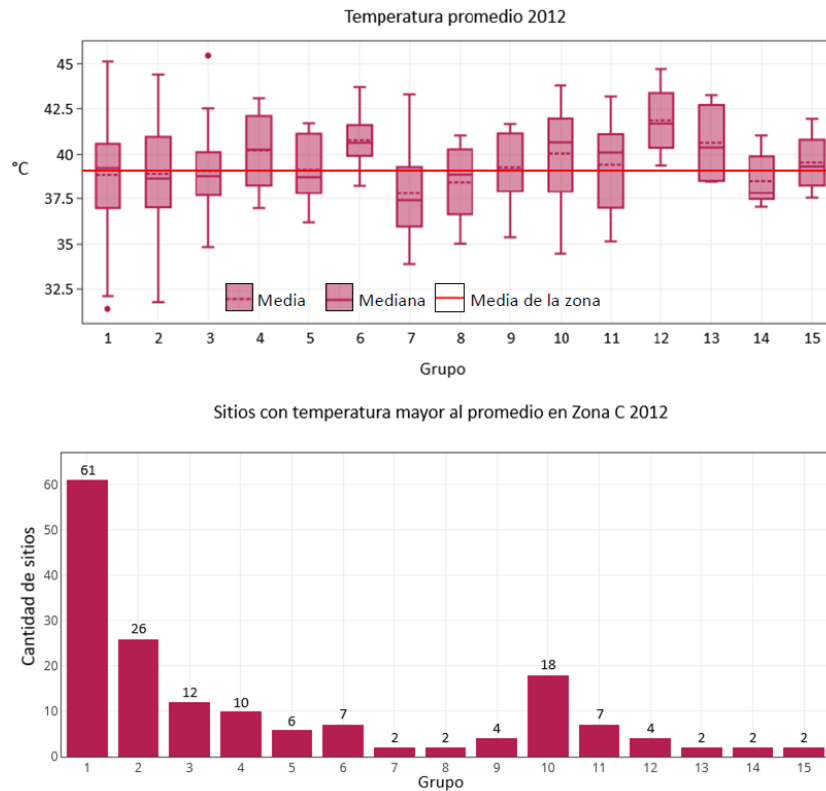


Figura 43. Temperaturas superficiales por grupo (arriba) y sitios con temperatura mayor a la media (abajo) en zona C 2012.

Zona D

La temperatura superficial media de la zona D, fue de 27.49 °C y 27.73 °C, para 2011 y 2012 respectivamente. Las imágenes satelitales utilizadas para el cálculo de la temperatura superficial del suelo corresponden al mes de octubre para ambos años. Se puede apreciar que, en esta zona, la temperatura general de la zona no varía mucho para los años 2011 y 2012.

En 2011, los sitios ubicados con presencia de RS que superan la temperatura media en la zona, es de 21 sitios, de un total de 32. El grupo que muestra la mayor cantidad de sitios es el grupo 1.

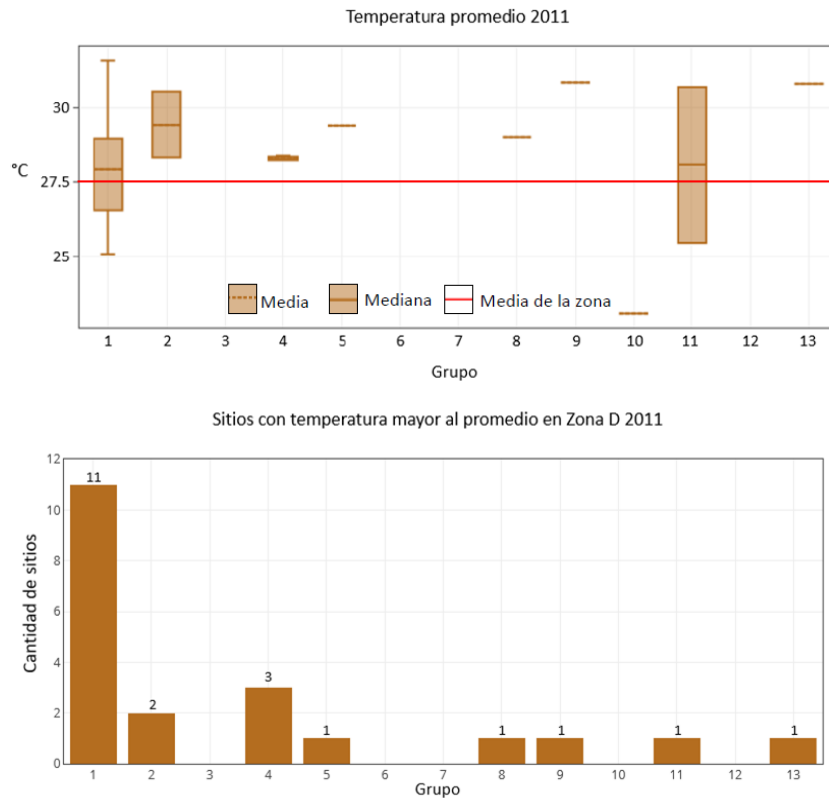


Figura 44. Temperaturas superficiales por grupo (arriba) y sitios con temperatura mayor a la media (abajo) en zona D, de 2011.

Para el año 2012, los sitios que superan la temperatura superficial media de la zona son de 17 sitios. Siendo el grupo 1 que presenta la cantidad de 8 sitios que superan la temperatura media de la zona.

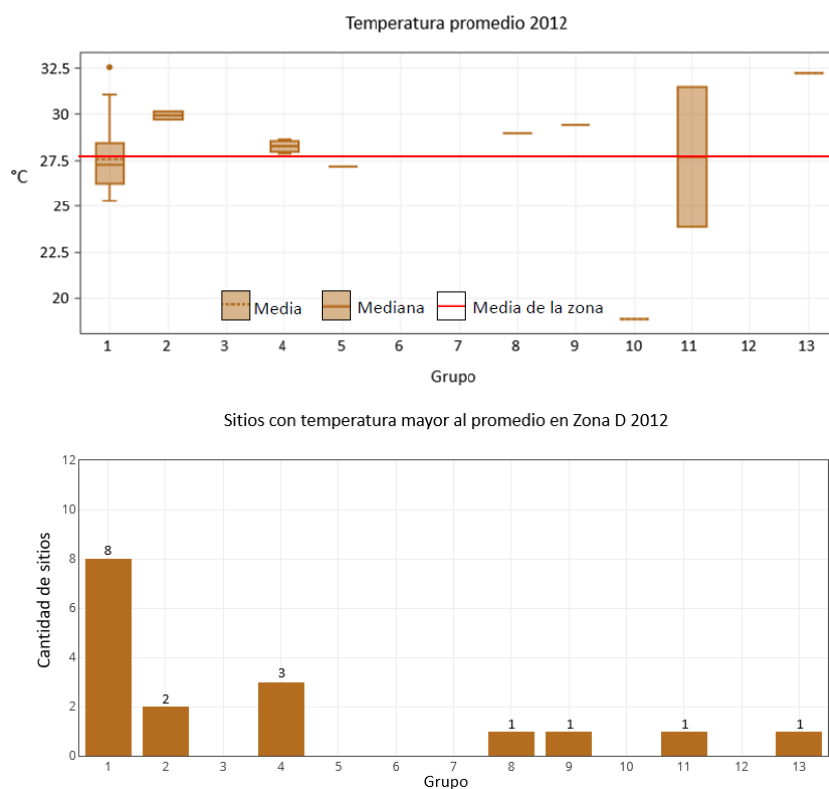


Figura 45. Temperaturas superficiales por grupo (arriba) y sitios con temperatura mayor a la media (abajo) en zona D 2012.

5.5 Evaluación de la calidad del aire

La medición de la concentración de gas metano en la ciudad de Puebla, demostró que los valores más altos del gas se concentran en la parte noreste y oeste de la ciudad. Aunque también se presentaron algunas concentraciones altas en la parte central. En cuanto a las concentraciones de metano más bajas, se encontraron principalmente en la parte sur de la ciudad. Los valores moderados del gas se presentaron dispersos a lo largo de toda la ciudad, con una poca frecuencia en la parte centro-norte, pero no con la misma frecuencia que tienen los valores altos en la parte noreste y los valores bajos al sur.

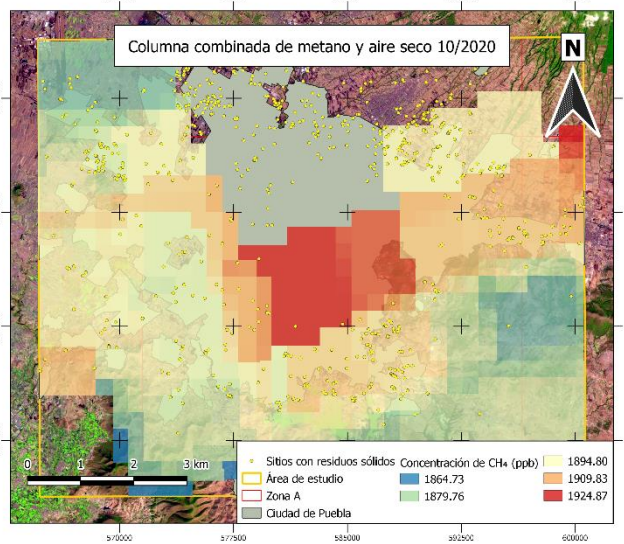
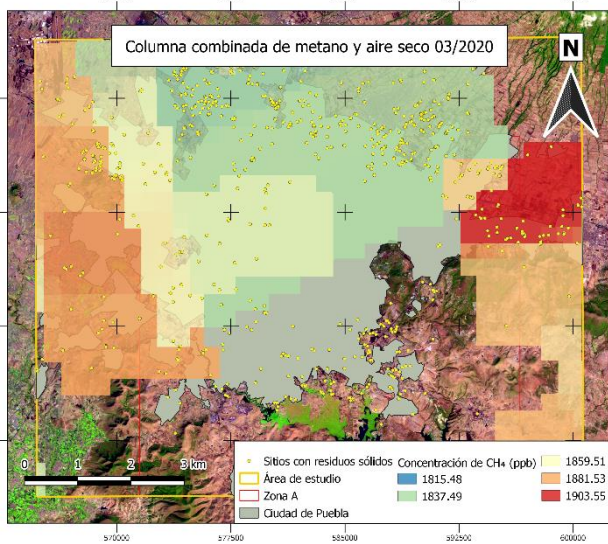
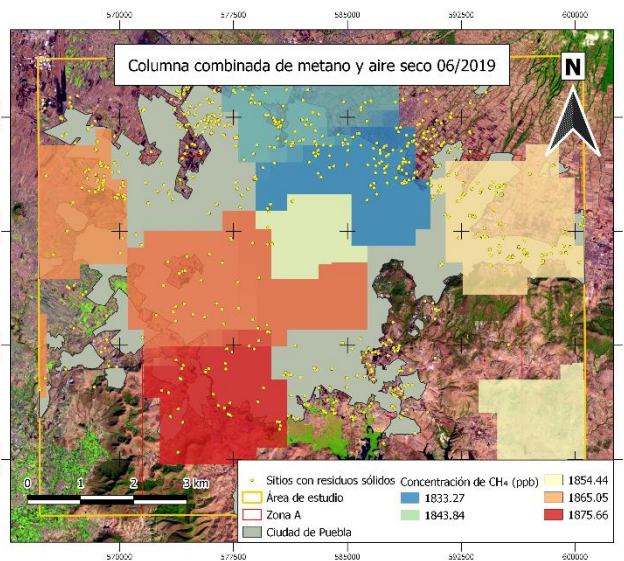
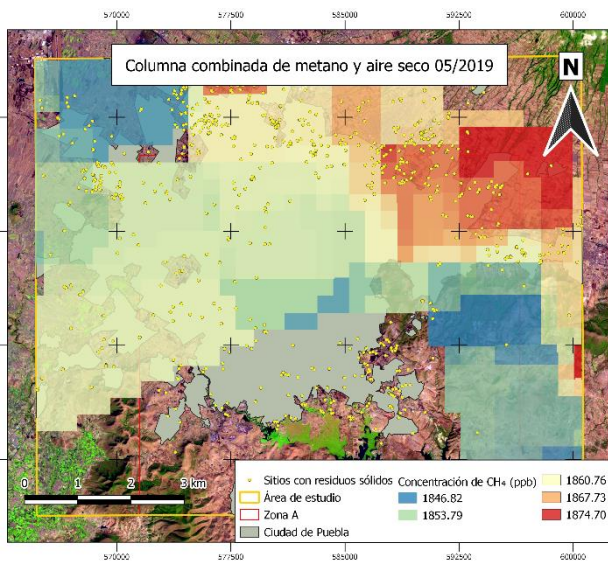
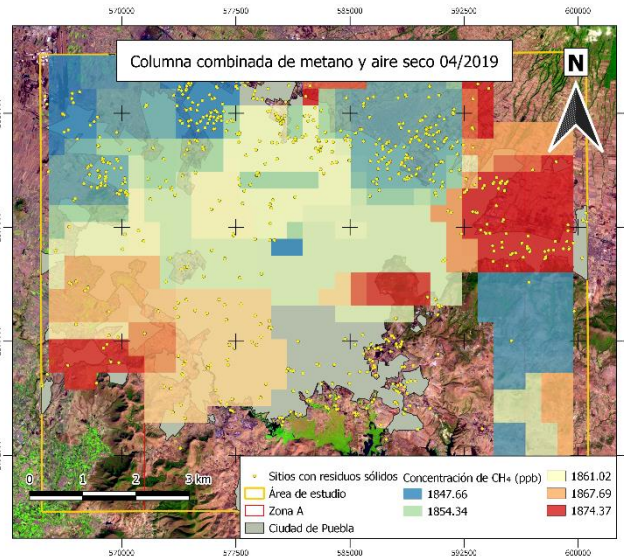
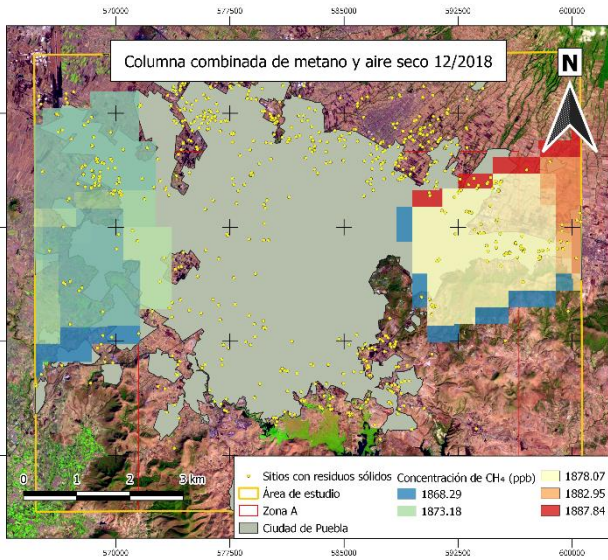


Figura 46. Concentraciones de metano en la zona de estudio.

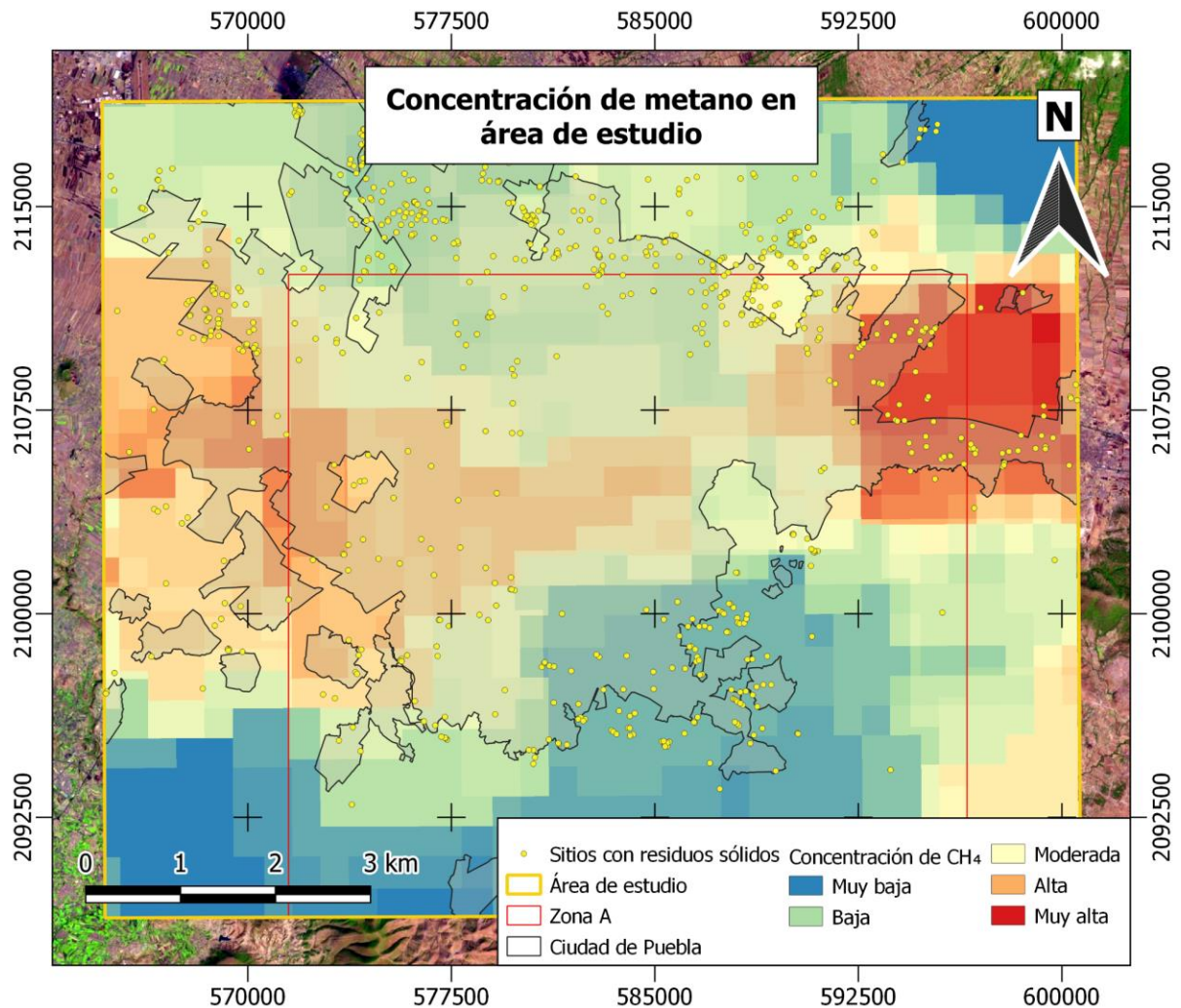


Figura 47. Concentraciones de gas metano en el área de estudio.

Al realizar la reclasificación de la concentración media del metano en el área de estudio, se pudo apreciar mejor las zonas de acumulación del metano. Este mapa muestra que en la parte noreste y oeste de la ciudad se concentra la mayor cantidad de gas. Donde se puede apreciar un brazo que se alarga del oeste de la ciudad hasta casi tocar la zona de mayor acumulación del gas. También se puede apreciar que, en la parte suroeste y la parte superior noreste, la acumulación del metano es muy baja. Por último, se observa que, en la mayoría de la parte norte y sureste, la concentración del metano es moderada.

5.6 Análisis estadísticos de variables ambientales

El análisis estadístico de las variables ambientales se realizó aplicando el análisis de componentes principales (ACP) y una regresión lineal, a la media de los datos en 2011, 2012 y 2019, y a los datos en 2019 de las variables medidas en los sitios con RS en la zona A del área de estudio. Los resultados se describen a continuación.

5.6.1 Análisis de componentes principales (ACP)

Con los datos recopilados en los sitios con RS, se realizaron dos ACP. El primero, se realizó usando la media de todos los datos homologados de 2011, 2012 y 2019. Y el segundo, se realizó únicamente con los datos medidos en 2019. Al realizar los dos análisis, se observó que las dos primeras componentes en cada uno de los análisis explicaban el 82.05% y el 83.79% de los datos respectivamente. Estas componentes principales se tomaron para crear el plano principal, el cual sirve para representar las observaciones y las relaciones entre las variables en dos dimensiones. El porcentaje que explica cada una de las componentes se muestra en la tabla siguiente.

Tabla 13. Resumen de las componentes para el ACP de los datos totales en los años 2011, 2012 y 2019 (izquierda) y los datos de 2019 (derecha).

Info. ACP	Datos totales			Datos 2019		
	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3
Desviación estándar	1.23	0.97	0.73	1.29	0.92	0.7
Porción de varianza	0.5	0.32	0.18	0.55	0.28	0.16
Varianza acumulada	0.5	0.82	1	0.55	0.84	1

Para confirmar que componentes principales explican mejor a las variables, se realizó una correlación entre los datos originales y las componentes principales seleccionadas. La correlación en la primera componente del primer ACP, mostró una

relación inversa alta en las variables de temperatura superficial (*LST* por sus siglas en inglés *Land Surface Temperature*) y metano. Para la segunda componente, la mayor correlación se obtuvo con la vegetación (*NDVI*), siendo una relación inversa alta. Para verificar que las relaciones fueran correctas, se usó el coeficiente de determinación, el cual confirmó que las variables están bien representadas en cada una de las componentes seleccionadas, como lo muestra la tabla siguiente:

Tabla 14. Correlación de las variables con las componentes del ACP para los datos totales.

Correlación de variables y componentes principales - Datos totales

Variables	Coeficiente de Pearson		Coeficiente de determinación (R^2)	
	PC1	PC2	PC1	PC2
LST	-0.84	0.09	0.71	0.01
NDV	-0.44	-0.89	0.19	0.79
CH ₄	-0.78	0.40	0.61	0.16

En el segundo ACP, la correlación de las variables con la primera componente demostró que la temperatura superficial y la vegetación poseen una relación directa alta y moderada respectivamente con los datos originales, lo que indica que estas variables están bien representadas por la primera componente. En la segunda componente principal, la correlación mostró una relación directa alta con el metano, por lo tanto, esta componente es la que describe mejor esta variable. Para confirmar las correlaciones, también se utilizó el coeficiente de determinación para mostrar que las variables estuvieran bien representadas.

Tabla 15. Relación de las variables con las componentes del ACP para los datos de 2019.

Correlación de variables y componentes principales - Datos 2019

Variables	Coeficiente de Pearson		Coeficiente de determinación (R^2)	
	PC1	PC2	PC1	PC2
LST	0.85	-0.07	0.72	0.005
NDV	-0.74	0.55	0.55	0.30
CH ₄	0.63	0.74	0.40	0.55

El comportamiento de los grupos con RS y las relaciones de las variables medidas para los dos ACP, se describen mejor con el plano principal en cada uno de los casos. En este plano se toman como ejes a las componentes principales seleccionadas para graficar las observaciones y las variables, y así, identificar agrupaciones y características en cada una de las observaciones.

Plano principal y observaciones para el primer ACP

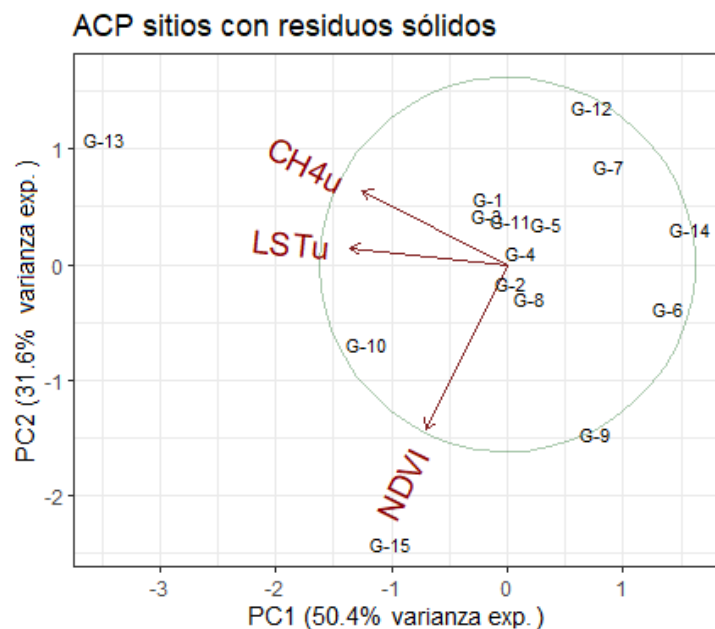


Figura 48. Plano principal para las observaciones y variables totales de 2011, 2012 y 2019.

El plano principal del primer ACP corresponde a la media de todos los datos homologados en 2011, 2012 y 2019. Dentro del plano, se encuentran las variables en forma de flecha dentro de un círculo llamado círculo de correlaciones. Y dentro de este círculo, se observa una alta relación entre la temperatura superficial y el metano, por el pequeño ángulo que se forma entre las variables. Para la variable de vegetación y metano su relación es casi nula, ya que estas variables forman un ángulo de 90 grados entre sí. Por último, la vegetación y la temperatura superficial muestran un ángulo menor a los 90 grados, indicando una relación muy baja entre estas variables.

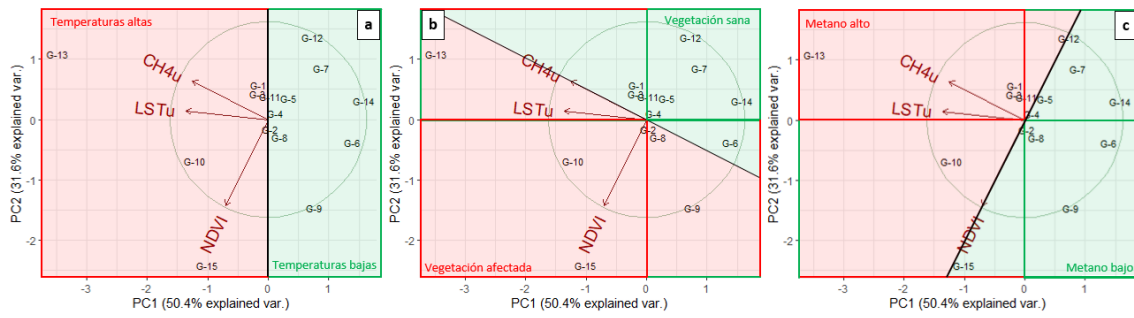


Figura 49. Interpretación visual del plano principal para las variables: a) Temperatura, b) Vegetación y c) Metano.

Las características de las observaciones dentro del plano varían de acuerdo con su ubicación. La parte izquierda del plano indica valores altos de temperatura superficial y gas metano en los sitios identificados, en cambio el lado derecho del plano, indica las temperaturas más bajas y las menores concentraciones de metano dentro de los sitios. La parte inferior del plano muestra a la vegetación más afectada por la presencia de RS y la parte superior indicaría una vegetación muy poco dañada e incluso la que tiene una vegetación densa. Por lo que, las ubicaciones de las observaciones en el plano indican cómo se comportan las variables dentro de los sitios con RS.

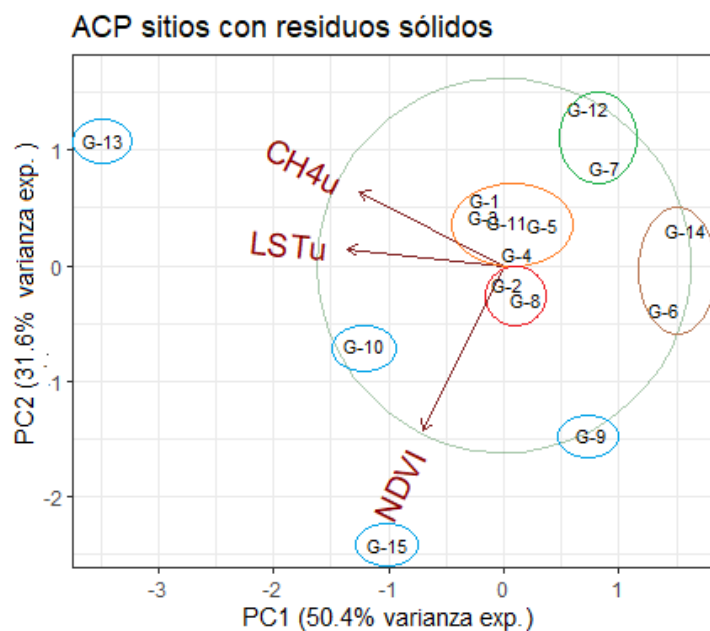


Figura 50. Plano principal para las observaciones por grupos y datos totales de 2011, 2012 y 2019.

El grupo rojo se ubica en la parte central del plano, con un pequeño desplazamiento hacia la parte inferior del centro, lo que indica una vegetación moderadamente afectada, relacionada principalmente a suelo con escasa vegetación. Además, la ubicación de este grupo muestra que la temperatura superficial y la concentración de metano estarían un poco por debajo de los valores medios registrados en todos los sitios (27°C y 1871 ppb de temperatura y metano respectivamente), estando su temperatura alrededor de los 25°C y teniendo una concentración baja de metano dada su ubicación en el plano. En el caso del grupo naranja, este grupo también se ubica en la parte central del plano, pero con un desplazamiento a la parte superior, mostrando un estado de la vegetación relacionado a suelo con escasa densidad vegetal, que se puede encontrar en mejores condiciones en comparación al grupo rojo. Por la ubicación de este grupo la temperatura superficial y la concentración de metano, indica un comportamiento regular en las dos variables, alrededor de 27°C y una concentración moderada de metano. El grupo de color verde se encuentra en la parte superior derecha del plano, lo que mostraría a la vegetación más densa y con menores afectaciones en comparación a los grupos anteriores. La temperatura superficial y concentración de metano en este grupo, muestra un comportamiento regular a los grupos anteriores. Para el caso del grupo café, este se ubica en la parte central derecha del plano, lo que indicaría afectaciones moderadas en la vegetación asociadas a suelo con escasa densidad vegetal en la observación G-6 y una vegetación en mejor estado para la observación G-14. En este grupo, la temperatura superficial y la concentración de metano presentan los valores más bajos de todos los grupos.

Las observaciones G-9, G-10, G-13 y G-15 encerradas de azul, tienen características diferentes entre ellas, por lo que se describen de forma independiente. La observación G-9 se encuentra en la parte inferior derecha del plano, indicando un alto daño en la vegetación asociado principalmente a suelo desnudo, e indicando valores muy bajos de la temperatura superficial y de las concentraciones de metano. La observación G-10, se encuentra en la parte central izquierda del plano, mostrando que esta observación se caracteriza por tener un alto daño en la vegetación, igualmente relacionado al suelo desnudo, con temperaturas y concentraciones de metano elevadas. La observación G-13, se encuentra en la parte superior izquierda del plano,

esta ubicación indica pocos daños en la vegetación, asociado a suelo con escasa vegetación. La temperatura superficial y la concentración de metano para esta observación, muestra los valores más altos de todos los grupos. Por último, la observación G-15 que se encuentra en la parte inferior central, indica el mayor daño a la vegetación de todos los grupos asociado a suelo desnudo, con una temperatura y concentración de metano similares a los grupos rojo, naranja y verde.

Plano principal y observaciones para el segundo ACP

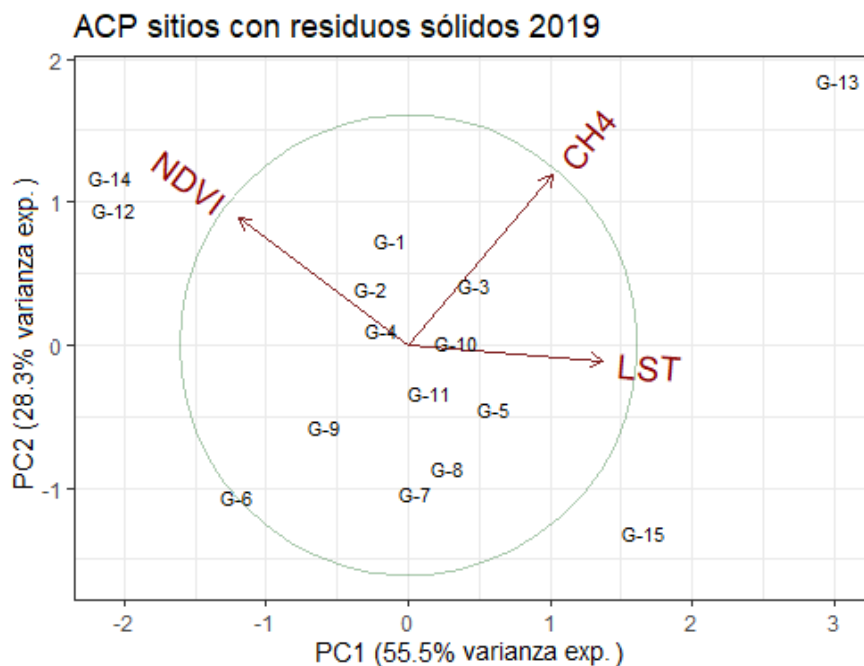


Figura 51. Plano principal para las observaciones y variables de 2019.

El plano principal del segundo ACP, corresponde a los valores medidos de 2019. Las variables dentro del círculo de correlaciones muestran una relación baja entre la concentración de metano y la temperatura superficial, ya que el ángulo que se forma entre ellos es menor a 90 grados. La relación de la vegetación con la concentración de metano fue nula, puesto que el ángulo entre estas variables es de 90 grados. Por último, la vegetación y la temperatura superficial muestran una relación inversa moderada, por el ángulo que forman es cercano a los 180 grados.

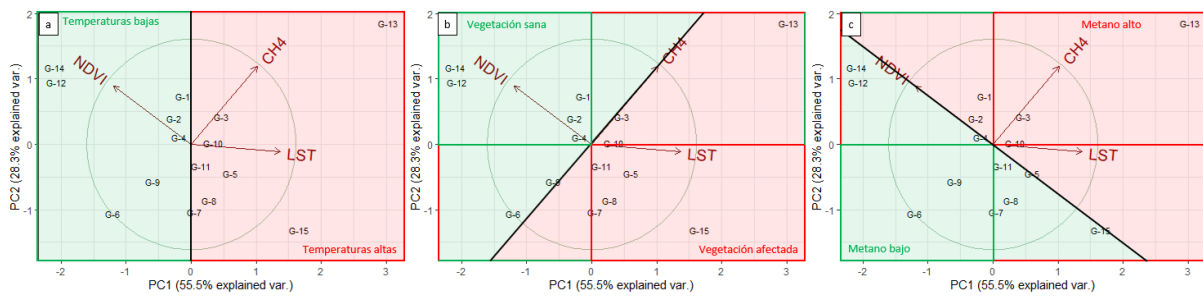


Figura 52. Interpretación visual del Plano principal para las variables: a) Temperatura, b) Vegetación y c) Metano.

El plano principal del segundo ACP, indica comportamientos diferentes al primer análisis. Esto se debe por el predominio que tiene la primera componente con la vegetación y la temperatura, dejando la concentración de metano el dominio de la segunda componente. Las observaciones que se encuentren en la parte derecha del plano corresponden a las mayores temperaturas superficiales, dejando el lado izquierdo del plano a los sitios con las temperaturas más bajas. Para el caso de la vegetación, las observaciones que se encuentren en la parte inferior derecha serán las que registran los mayores daños a la vegetación, y las que estén en la parte superior izquierda las de menor daño. Por último, en la concentración de metano en las observaciones, las que se encuentren en la parte superior derecha del plano, corresponderá a los valores más altos de metano, y por consecuencia las observaciones que se encuentren en la parte inferior izquierda tendrán las concentraciones más bajas de metano.

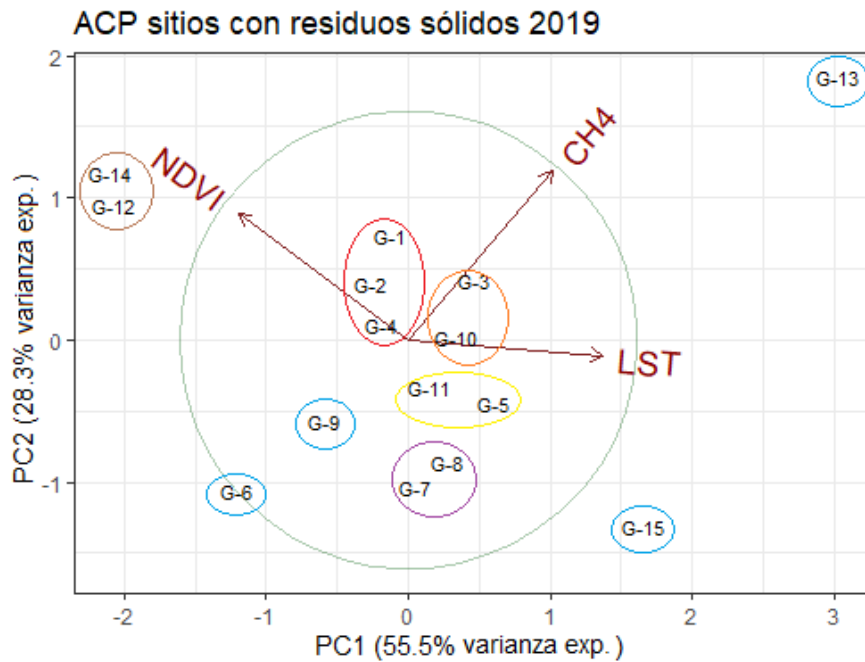


Figura 53. Plano principal para las observaciones por grupos y datos de 2019.

Los grupos que se forman dentro del plano principal del segundo ACP, tienen las siguientes características. El grupo con las observaciones encerradas en rojo, indica que los sitios con RS tienen un bajo impacto en la vegetación, relacionado a suelo con poca y muy poca vegetación. En este grupo se presentan temperaturas regulares por debajo de los 31.5°C y una concentración de metano moderada cercana a los 1862.65 ppb en las observaciones 2 y 4, y una concentración de metano un poco mayor en la observación 1. El grupo G-3 y G-10 encerrado con el círculo naranja, muestra que los sitios presentan una vegetación un poco más afectada que el grupo rojo, asociado a suelo con poca vegetación. Presenta temperaturas superficiales y concentraciones de metano superiores a la media principalmente en la observación G-3, con respecto a los sitios ubicados. El grupo marcado por el círculo amarillo se caracteriza por una vegetación más afectada que los grupos anteriores, lo que se asociaría a suelo con muy poca vegetación y suelo desnudo, principalmente en la observación G-5. La ubicación de este grupo muestra que la temperatura superficial es mayor a la media de los sitios, también principalmente en la observación G-5, y en la concentración de metano el grupo se encuentra un poco por debajo de la media. La ubicación del grupo color café, presenta la vegetación más saludable y las

temperaturas más bajas de todos los grupos, la concentración de metano para este grupo indica que es moderada. El grupo de color morado se caracteriza por tener una vegetación afectada, asociada a suelo con poca vegetación y tener una temperatura superior a la media en los sitios registrados, en la concentración de metano presenta una baja concentración.

Las observaciones encerradas en azul tienen características particulares. La observación G-6 presenta una vegetación poco afectada, asociada a suelo con poca vegetación. Este grupo presenta una temperatura superficial baja y las concentraciones más bajas de metano. Para la observación G-9, se muestra un bajo impacto en la vegetación asociado a suelo con escasa vegetación, acompañado de temperaturas por debajo de la media y una concentración de metano bajas para los sitios de este grupo. La observación G-13, tiene una vegetación moderadamente afectada asociada a suelo con muy poca vegetación, presencia de las más altas temperaturas y las mayores concentraciones de metano de todas las observaciones. Por último, la observación G-15, se caracteriza por tener la vegetación más afectada de todas las observaciones asociada a suelo desnudo, con temperaturas superficiales muy superiores a la mayoría de los grupos y una concentración de metano moderada con respecto a los demás grupos.

5.6.2 Regresión lineal de variables ambientales y mapa de densidad de sitios

La regresión lineal se realizó con las variables ambientales de 2019, en 4 de las 5 regiones del mapa de densidad. Debido a que en la región 1 solo tenía presencia de 3 sitios con RS y el área de esta región es muy extensa, el impacto de los sitios dentro de esta región no podría tener una gran influencia en el comportamiento general de las variables. Por este motivo se decidió descartar la regresión para la región 1. Los resultados para las demás regiones presentan comportamientos diferentes de acuerdo con la zona donde se ubican.

Regresión lineal de variables ambientales en región 5

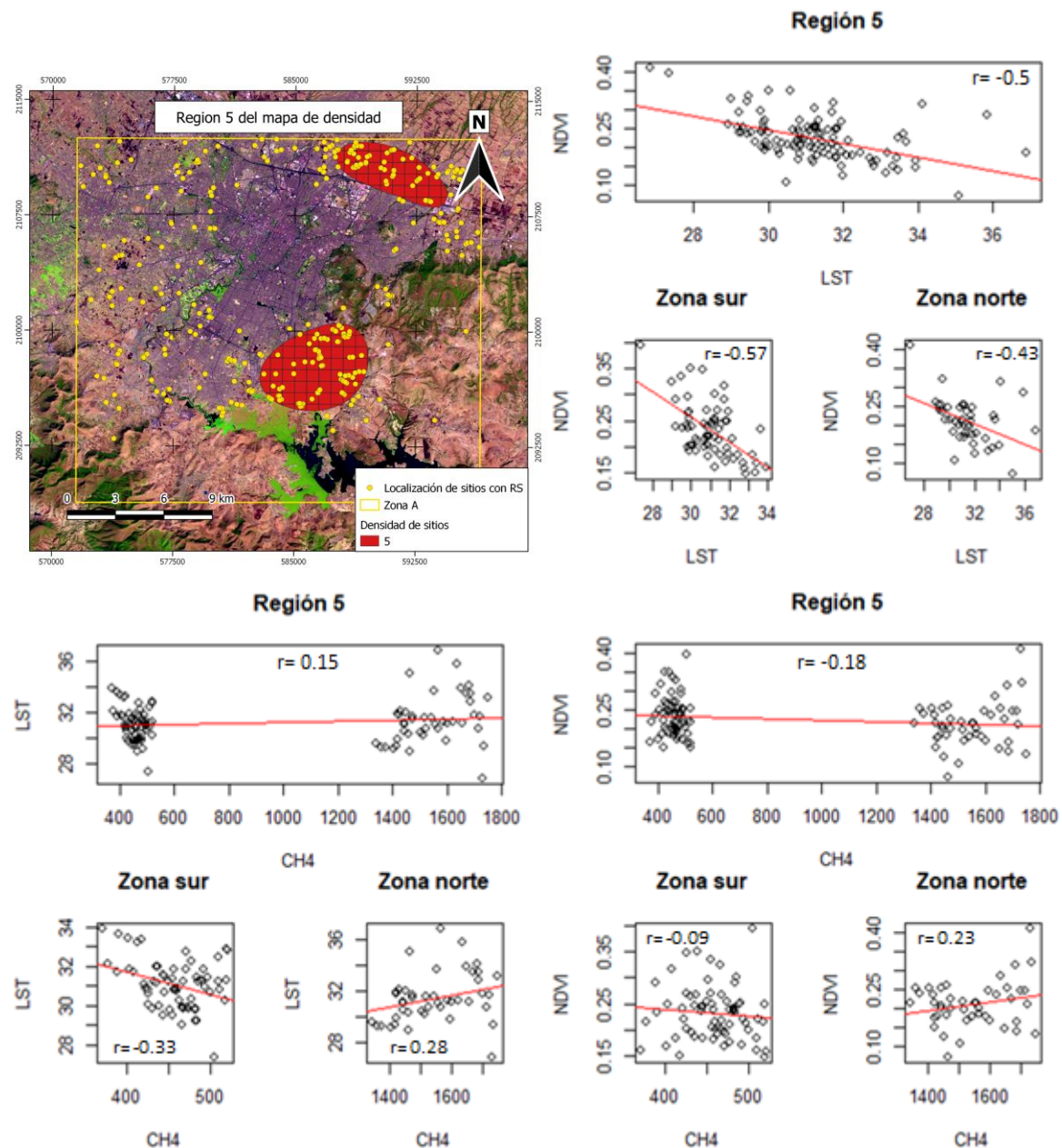


Figura 54. Ubicación de la región 5 del mapa de densidad y relación lineal de variables ambientales en la región y zonas.

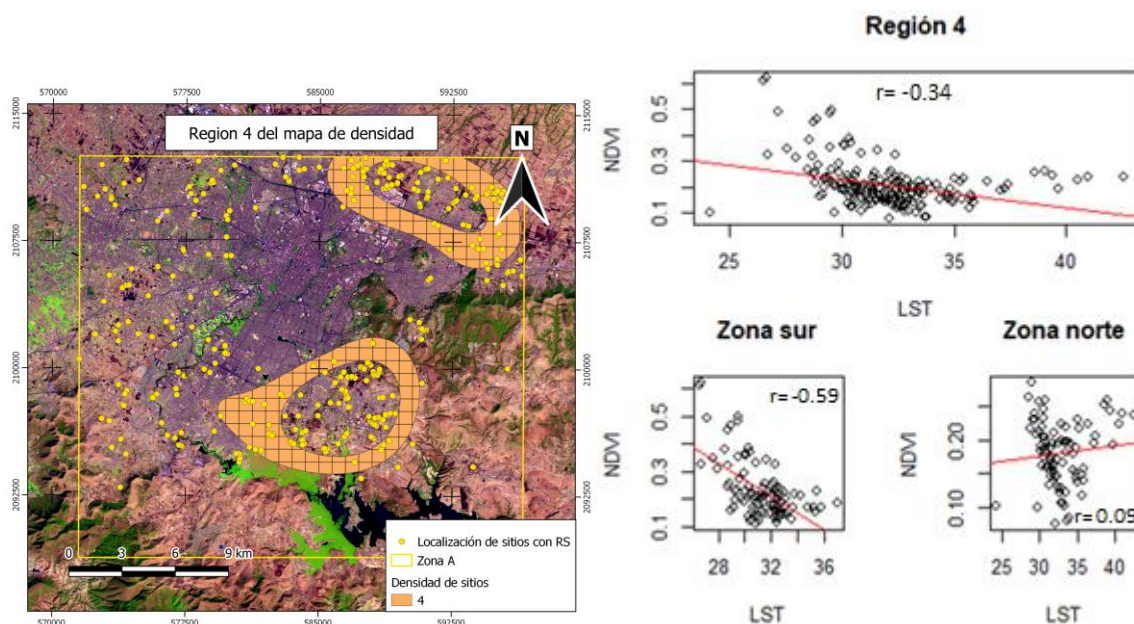
La regresión lineal para la región 5 del mapa de densidad se conforma por dos grupos ubicados al sur y norte de la ciudad. Las variables de vegetación (*NDVI*) y temperatura superficial (*LST*) en toda la región muestran una relación inversa moderada de -0.5. Al realizar la regresión lineal por separado en las zonas sur y norte, se observó un aumento en la relación de la vegetación con la temperatura superficial

en la zona sur, con un valor de -0.57, y en la zona norte una disminución en su relación con -0.43.

Con respecto al comportamiento de la temperatura superficial con la concentración de metano (CH_4) para toda la región 5, se observan dos grupos muy separados que generan una relación muy baja de 0.15. El primer grupo con los valores más bajos de metano corresponde a la zona sur, y los valores más altos corresponden a la zona norte. Al realizar las correlaciones para cada una de las zonas, se observó que sus relaciones cambiaron en comparación con toda la región, dando para la zona sur una relación inversa baja de -0.33 y para la zona norte una baja relación directa de 0.28.

En la relación de la vegetación con la concentración de metano, se observó que la región tiene una baja relación inversa de -0.18 entre estas variables. Al realizar la correlación en las zonas sur y norte, se mostró que en la zona sur no hay una relación para estas variables, ya que la correlación obtenida fue de -0.09. En cambio, en la zona norte se observó que existe una relación directa baja de 0.23.

Regresión lineal de variables ambientales en región 4



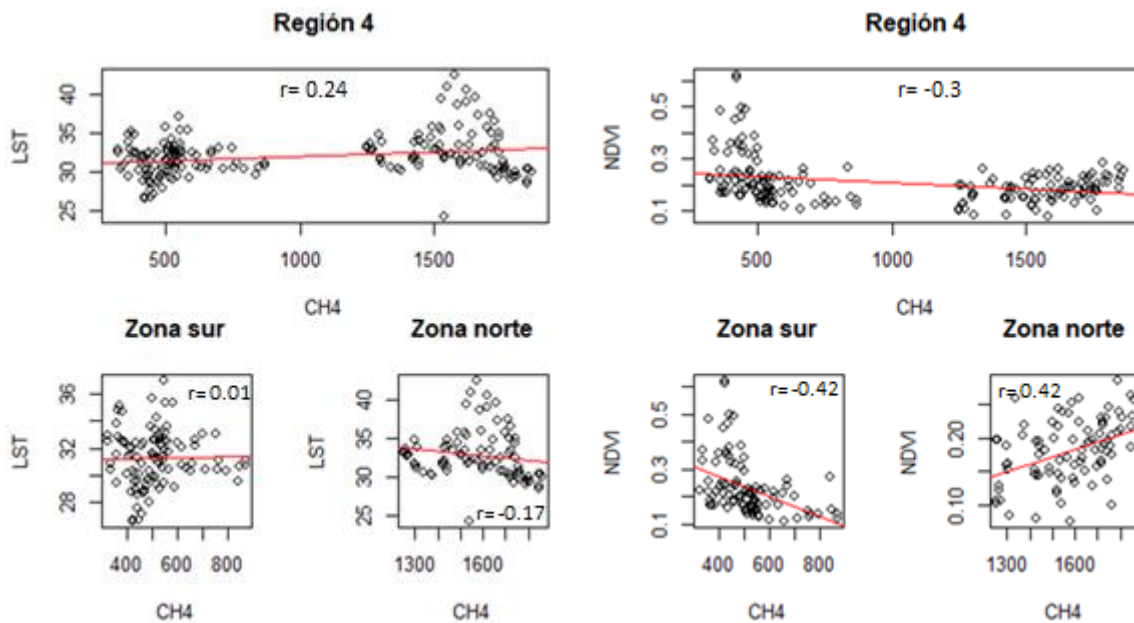


Figura 55. Ubicación de la región 4 del mapa de densidad y relación lineal de variables ambientales en la región y zonas.

Esta región también está compuesta por dos áreas ubicadas al sur y norte de la ciudad, como en la región 5. Al realizar la regresión lineal de la vegetación y temperatura superficial en esta región, se obtuvo una relación inversa moderada de -0.34. Al aplicar la correlación por separado en las zonas sur y norte, se obtuvo una relación inversa moderada de -0.59 y una relación inversa casi nula de -0.09 para cada una de las zonas respectivamente.

La regresión lineal de la temperatura superficial y concentraciones de metano en toda la región 4, dio una relación de 0.24, en la que se observan dos grupos en los que también se separan los datos, como en la región 5. Siendo el primer grupo los valores más bajos de concentración de metano que corresponden a la zona sur y el segundo grupo a la zona norte con las concentraciones más altas. La regresión lineal en cada una de estas áreas mostró que en la zona sur se tiene una relación nula de 0.01 y en la zona norte se tiene una relación inversa baja de -0.17.

En la regresión de la vegetación con la concentración del metano en esta región, se obtuvo una correlación inversa baja de -0.3. Al realizar la regresión para las zonas sur

y norte en las que se divide la región 4, se observó un aumento de las correlaciones en la zona sur y norte, con una relación inversa moderada de -0.42 y una relación directa moderada de 0.42 respectivamente.

Regresión lineal de variables ambientales en región 3

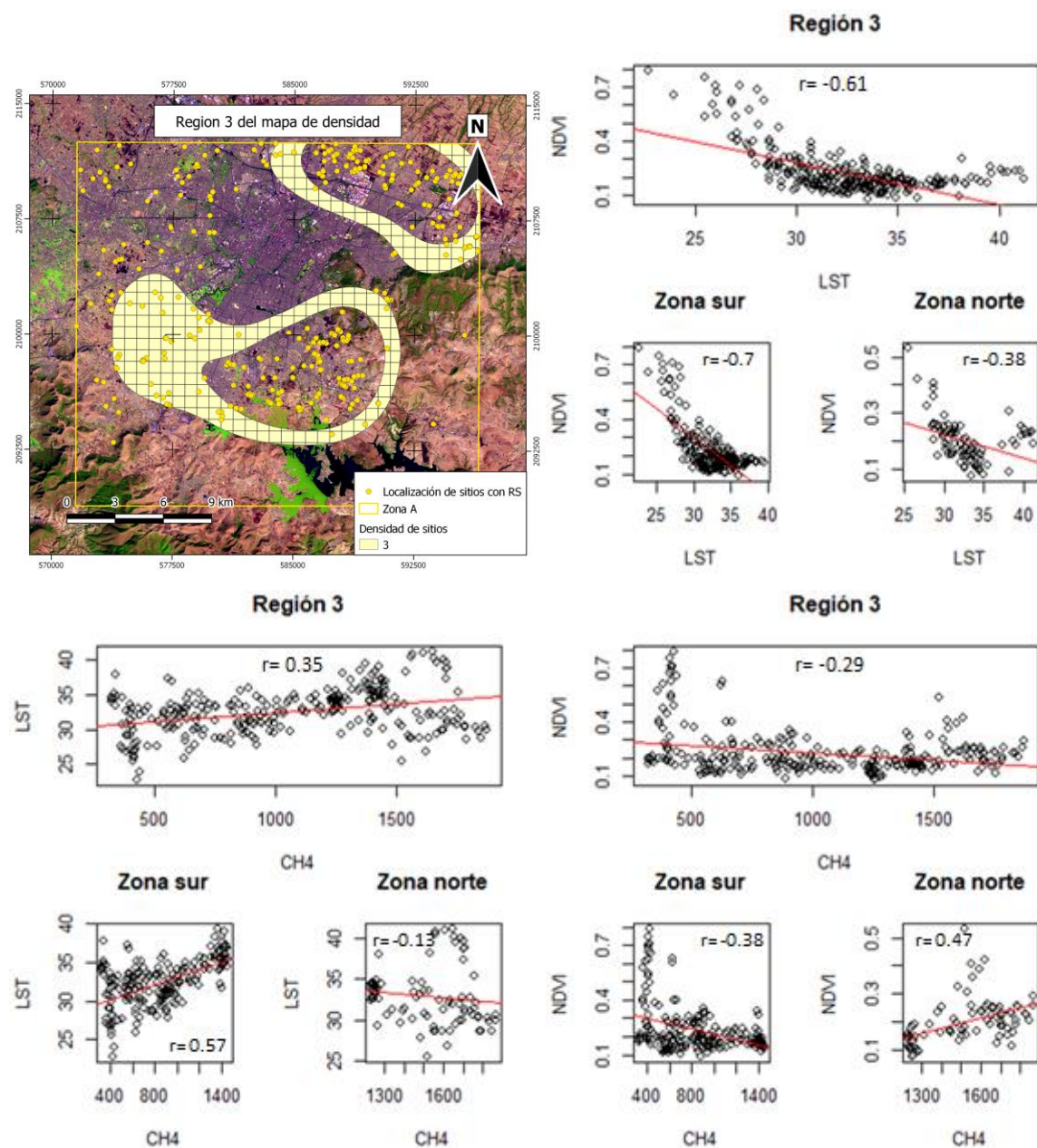


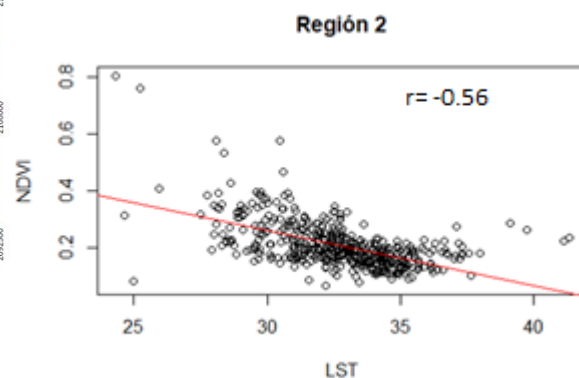
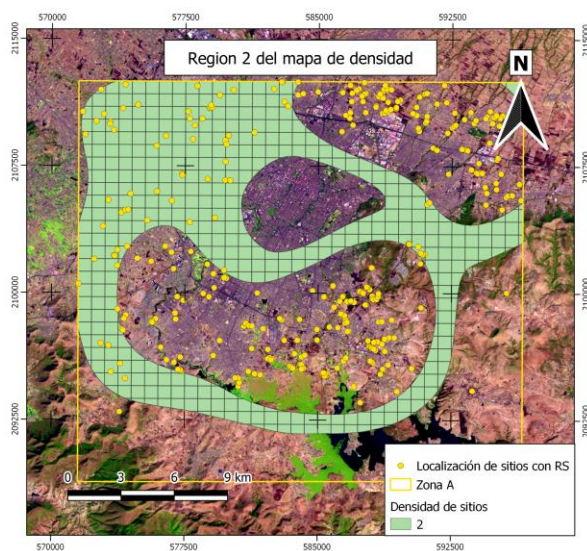
Figura 56. Ubicación de la región 3 del mapa de densidad y relación lineal de variables

En la región 3 del mapa de densidad, al igual que las regiones anteriores, se presentan dos áreas separadas, que se encuentran ubicadas al sur y norte de la ciudad. Al realizar la regresión de la vegetación y la temperatura superficial para toda la región, se obtuvo una relación inversa alta de -0.61 . Pero al aplicar la regresión por separado en las zonas sur y norte, se obtuvo una relación inversa alta de -0.7 y una relación inversa moderada de -0.38 respectivamente. Mostrando que, en la zona sur, la correlación de las variables es mayor al obtenido en toda la región.

La regresión lineal de la temperatura superficial y concentración de metano, en la región mostró una relación directa baja de 0.35 , Al realizar la regresión lineal por separado en las zonas sur y norte de la región, se obtuvo una relación moderada para la zona sur con un valor de 0.57 , y una gran disminución de la relación en la zona norte con un valor de -0.13 .

Al evaluar la correlación de la vegetación y la concentración de metano en la región, se observó una relación inversa baja de -0.29 . Para las zonas sur y norte se obtuvo una mayor relación en cada una de las zonas sur y norte, por separado, ya que en la zona sur se obtuvo una relación inversa baja de -0.38 y para la zona norte una relación directa moderada de 0.47 .

Regresión lineal de variables ambientales en región 2



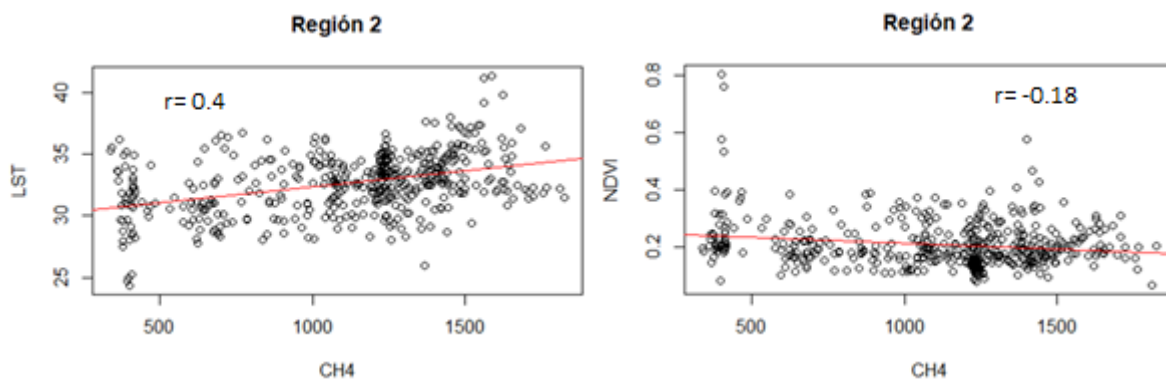


Figura 57. Ubicación de la región 2 del mapa de densidad y relación lineal de variables ambientales en la región.

La región 2 del mapa de densidad se diferencia de las regiones anteriores, debido a que esta región no tiene una división de su área en grupos. Por lo que el análisis de esta región se realizó en toda su área. Al aplicar la regresión lineal de la vegetación con la temperatura superficial, se mostró que estas variables tenían una relación inversa moderada de -0.56. Para la temperatura superficial con la concentración de metano, se observó una relación directa moderada de 0.4. Y por último, la regresión de la vegetación con la concentración de metano, mostró una relación inversa baja de -0.18.

Capítulo 6: Discusión

Este trabajo de investigación evalúa el impacto ambiental que generan los RS en la ciudad de Puebla, para ello se realizó una búsqueda manual de sitios con presencia de RS y un procesamiento de imágenes satelitales *RapidEye*, *Landsat 7* y *Sentinel 5p*, en las cuales se midieron, clasificaron y analizaron las variables ambientales de vegetación (a partir del índice *NDVI* y una clasificación del cambio en el tipo del suelo), temperatura superficial del suelo y calidad del aire por presencia de metano. Es importante mencionar, que los análisis estadísticos se aplicaron únicamente para la zona A del área de estudio, debido a que esta zona, fue la única en la que se pudo conseguir imágenes satelitales de alta resolución para los años

2011, 2012 y 2019, por lo tanto, se deja como trabajo futuro el análisis de las demás zonas.

Discusión sobre la localización de sitios con RS en la ciudad de Puebla

Para la localización de los sitios con presencia de RS mal gestionados en la ciudad de Puebla, se buscó información de las ubicaciones de los sitios en plataformas gubernamentales e informes oficiales como lo hicieron Silvestri, S., & Omri, M. 2008; Glanville, K., & Chang, H. C. 2015, que contaban con una base de datos con las ubicaciones de tiraderos clandestinos y abandonados para realizar sus mediciones. Para el caso de la ciudad de Puebla, se pretendía usar la plataforma Espacio Digital Geográfica (ESDIG) de la SEMARNAT, que contiene un registro de las ubicaciones de los sitios de disposición final de RS en todo el país. Sin embargo, en la plataforma, para el caso de la ciudad de Puebla sólo se mostraba la ubicación de dos sitios en toda la ciudad, lo cual contrastaba con los reportes de la población en medios de comunicación locales, que informaban de la presencia de varios de estos sitios, principalmente en la parte norte y sur de la ciudad (Marcial, N. 2018, 2019; Mirón, M. A. 2018; Román, E. 2020). Este hecho hizo que se tomara la decisión de cartografiar manualmente los sitios con RS dentro del área de estudio. Ya que el registro de la ESDIG no coincide con los reportes de la población por la presencia de estos sitios a lo largo de toda la ciudad.

Para la localización de los sitios, se tomó una mayor prioridad a las partes norte, sur y periférica de la ciudad. Ya que, estos lugares podrían arrojar mejores resultados, al disminuir la interferencia de la zona urbana al identificar los sitios con RS. Es importante destacar, que el intervalo de búsqueda de los sitios con RS se hizo para un intervalo temporal específico, que podría ser más relevante para estudios cercanos al año 2019. Debido a que las ubicaciones de los sitios con RS pueden ir variando con el paso del tiempo, por lo que no se puede asegurar que estos sitios se encuentren en las mismas ubicaciones para fechas anteriores e incluso posteriores. Además, se debe destacar que la mayoría de los sitios identificados poseen un rango de dimensiones muy amplio, lo que dificulta la tarea de descripción. Este hecho motivó la decisión de descartar a todos los sitios cuyas dimensiones fueran menores a 100 m^2 y agrupar a los sitios restantes en 15 grupos, de acuerdo con sus dimensiones,

para que se tuviera una mejor organización, se pudieran describir con mayor facilidad los sitios y se pudiera tener un área que pudiera apreciarse dentro de las imágenes satelitales.

Discusión sobre la evaluación del estrés de la vegetación

En cuanto a la evaluación del estrés de la vegetación, en esta investigación se utilizaron las imágenes satelitales *RapidEye* para obtener el índice *NDVI* como un bioindicador de los efectos que los RS están generando sobre los sitios, así como lo aplicaron Silvestri, S., & Omri, M. (2008) y Yang, K., Zhou, X. N., Yan, W. A., Hang, D. R., & Steinmann, P. (2008). Los resultados obtenidos del *NDVI* en los 15 grupos de sitios con RS, muestran que la mayor parte de estos sitios se encuentran sobre áreas con escasa vegetación, suelo desnudo y zona urbana. Ya que los valores en el histograma *NDVI* para los sitios ubicados, se encuentran entre 0.05 y 0.25. Lo que se asocia directamente con los resultados del mapa de cambio de uso del suelo, donde las principales coberturas dentro de los sitios con RS fueron suelo desnudo, suelo con poca vegetación, pastizales y zona urbana. Variando la vegetación durante los cambios estacionales del año, lo que puede indicar que los sitios más pequeños con RS se encuentran sobre zonas con vegetación intermitente.

Una característica importante que debe ser resaltada, es que, dentro de algunos de los sitios con RS, también se mostró la presencia de vegetación densa. Lo que puede indicar que los residuos no tienen mucho tiempo depositados, pudieron ser desplazado los residuos creciendo la vegetación o que los residuos se encuentran en una zona con alta humedad, lo que puede coincidir con lo reportado por Yang, K. *et al.*, (2008). Que mencionan que una alta humedad cercana a los RS puede generar un mayor impacto a la zona, ya que la alta presencia de humedad incrementa la escorrentía del lugar, propiciando la generación y posterior infiltración de lixiviados al subsuelo. Por otro lado, los sitios con RS de mayor cobertura presentan un mayor porcentaje de zona urbana, pudiendo deberse el enmascaramiento de los sitios por la infraestructura civil alrededor de los sitios, e incluso los mismos residuos podrían estar mostrando una respuesta espectral similar al de la zona urbana, ya que la alta heterogeneidad de la materia que compone a los residuos podría estar siendo tomada como zona urbana en la clasificación de los tipos de suelo.

Un factor que es importante destacar para la evaluación de la vegetación, es que las imágenes satelitales *RapidEye* utilizadas no corresponden a las mismas fechas de captura, lo que se puede apreciar en los resultados de la clasificación de los tipos de suelo predominantes en la ciudad, ya que, en la última clasificación correspondiente a mayo de 2019, la clasificación resultante mostró una clara diferencia a los años anteriores. Esto se pudo apreciar desde los histogramas del *NDVI* de las imágenes, ya que su comportamiento principal se situaba en el tipo de suelo desnudo y poca vegetación. Para confirmar los resultados obtenidos en 2019, se revisó información del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) sobre las condiciones climatológicas de la zona de estudio para el mes de mayo de 2019. De acuerdo con los registros del SMN el mes de mayo de ese año, en gran parte de la república mexicana el nivel de precipitación estuvo por debajo de lo normal, lo que ocasionó el incremento de áreas con sequías anormales y moderadas, que se mantuvo por todo el mes de mayo (Servicio Meteorológico Nacional, 2019). Esto apoya los resultados obtenidos de 2019 en la clasificación de los tipos de suelo, debido a que los tipos de suelo obtenidos en ese año, puede ser consecuencia por el aumento de las áreas de sequía en la ciudad.

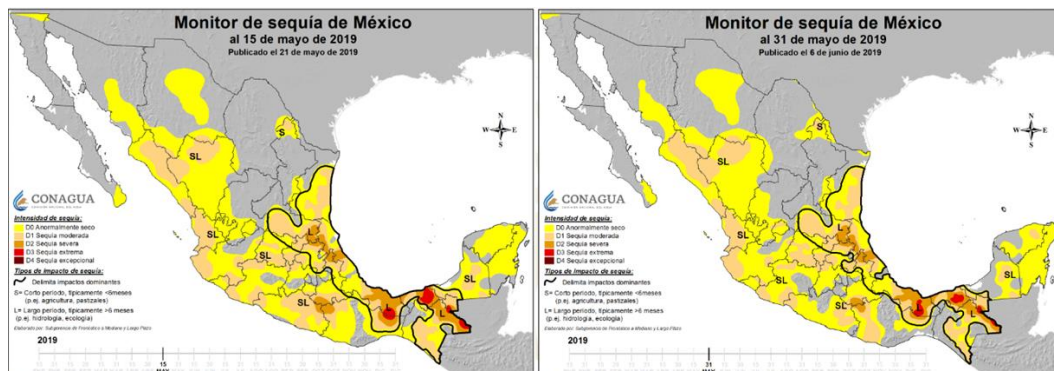


Figura 58. Sequía anómala en gran parte de la república mexicana. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional (2019).

Discusión sobre la evaluación de la temperatura superficial

Para obtener la temperatura superficial, se utilizaron imágenes satelitales de *Landsat 7* de acuerdo con el método de umbrales *NDVI* usado por Sobrino J. A. *et al.*, (2004). Los resultados revelan que la temperatura fue un buen indicador para identificar anomalías en varios de los sitios ubicados con RS, los cuales superan la temperatura media de toda la zona, lo que coincide con las investigaciones de Beaumont, B., Radoux, J., & Defourny, P. (2014); Faisal, K. S. (2011); Yang, K. *et al.*, (2008); y Mahmood, K., Batool, S. A., & Chaudhry, M. N. (2016). Las altas temperaturas registradas en los sitios pueden deberse a que las zonas donde se encuentran ubicados los RS tienen una pobre o nula cobertura vegetal, lo que ya fue corroborado por la evaluación de la vegetación, que mostró que gran parte los sitios identificados se encuentran en suelos con poca o nula vegetación y zona urbana, lo que aumentaría el nivel de exposición a la radiación solar, incrementando la temperatura superficial en estas zonas. Además, se cree que, dentro de algunos de los sitios ubicados con RS, puede existir un proceso activo de degradación que esté generando gases de vertedero, los cuales pudieran estar aumentando la temperatura superficial, principalmente en los sitios de mayor tamaño.

También una característica que debe destacarse de las temperaturas superficiales de los sitios es que existe una gran cantidad de sitios que cuentan con temperaturas más bajas respecto a la temperatura media de toda la zona. Este hecho, puede deberse a que los sitios se encuentran sobre áreas donde las corrientes de aire están dispersando los gases que emiten los RS al descomponerse o que los sitios están ubicados cerca de zonas con una alta humedad, entre otros factores que están disminuyendo la temperatura de la zona. Estos hechos no pueden ser conocidos directamente con el uso de las imágenes satelitales, por lo que se hace necesario una inspección directa de los sitios para verificar las condiciones que tienen y asegurar que las temperaturas observadas se deban principalmente a la ubicación en zonas descubiertas y/o descomposición de los residuos.

Es importante mencionar que una de las principales limitaciones al usar las imágenes de *Landsat 7*, es su poca resolución espacial. La cual es de 60 m por pixel, lo que ocasiona que los sitios con las menores dimensiones tomen las temperaturas de los alrededores y se oculten sitios que podrían tener mayores temperaturas. También otra de las limitaciones que se tiene al usar las imágenes *Landsat 7*, es que la falla

del sistema *SLC* reduce la calidad de los datos que se pueden obtener, al tener espacios sin información y una resolución espacial baja de la banda térmica (60 m), reduce considerablemente la calidad de los resultados.

Discusión sobre la evaluación de la calidad del aire con respecto a las concentraciones de metano.

Los resultados de la evaluación en la calidad del aire muestran que no existe una relación clara en la concentración de metano con la ubicación de los sitios con RS. Lo que contrasta con la investigación de Faisal, K. S. (2011), que indica que el metano es el principal gas que emiten estos sitios. En nuestro caso, se mostró que existen dos partes donde se concentran la mayor cantidad de los sitios con RS; norte y sur. En los cuales, las concentraciones de metano eran muy diferentes, siendo en la zona norte el área con la mayor concentración de metano y la zona sur el área con las mediciones más bajas de este gas. Nuestros resultados se asocian mejor con los resultados obtenidos por Díaz-Archundia, L. V., Buenrostro-Delgado, O., Mañón-Salas, M. D. C., & Hernández-Berriel, M. D. C. 2017; Yang, K. et al., 2008, que indican concentraciones superficiales bajas de metano en sus mediciones en sitios con RS.

Los factores que consideramos como los causantes de la acumulación desigual del metano en el área de estudio, es la topografía y las corrientes de viento en la zona. Ya que se observa que las concentraciones más altas de metano se registran en sitios donde se encuentran grandes diferencias de elevación, en las que se forman barreras que concentran el gas. Además, de acuerdo con los registros en las estaciones de monitoreo Puebla y Malinche II del SMN (2021), se puede apreciar que en la estación Puebla, los vientos tienen un predominio en la dirección noreste y poseen velocidades de hasta 7 m/s, y en la estación Malinche II, los vientos tienen una dirección predominante al oeste, con velocidades de hasta 6 m/s. Por lo que creemos que los vientos en la estación Malinche II no son lo suficientemente fuertes para dispersar los gases en la parte noreste de la ciudad. Por lo tanto, se cree que la topografía y los vientos en el área de estudio favorecen la concentración del metano en las zonas atrapadas entre los altos topográficos.

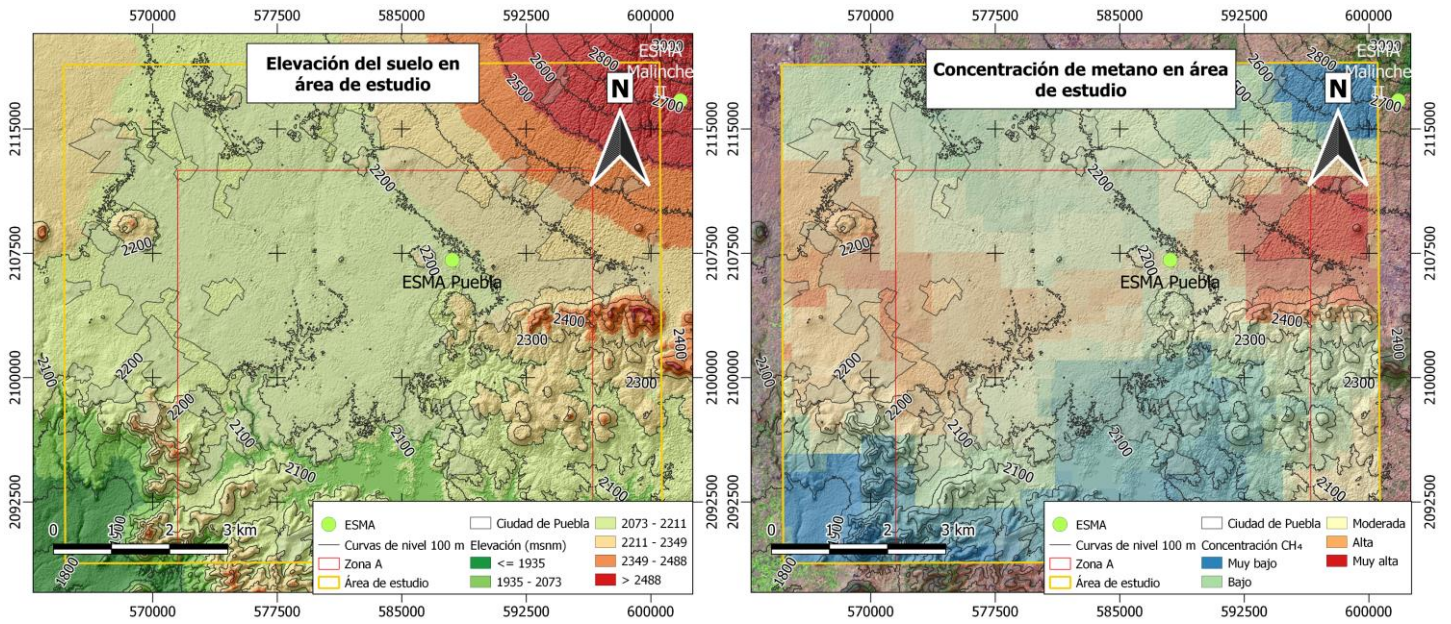


Figura 59. Elevación del suelo y concentración de metano en área de estudio.

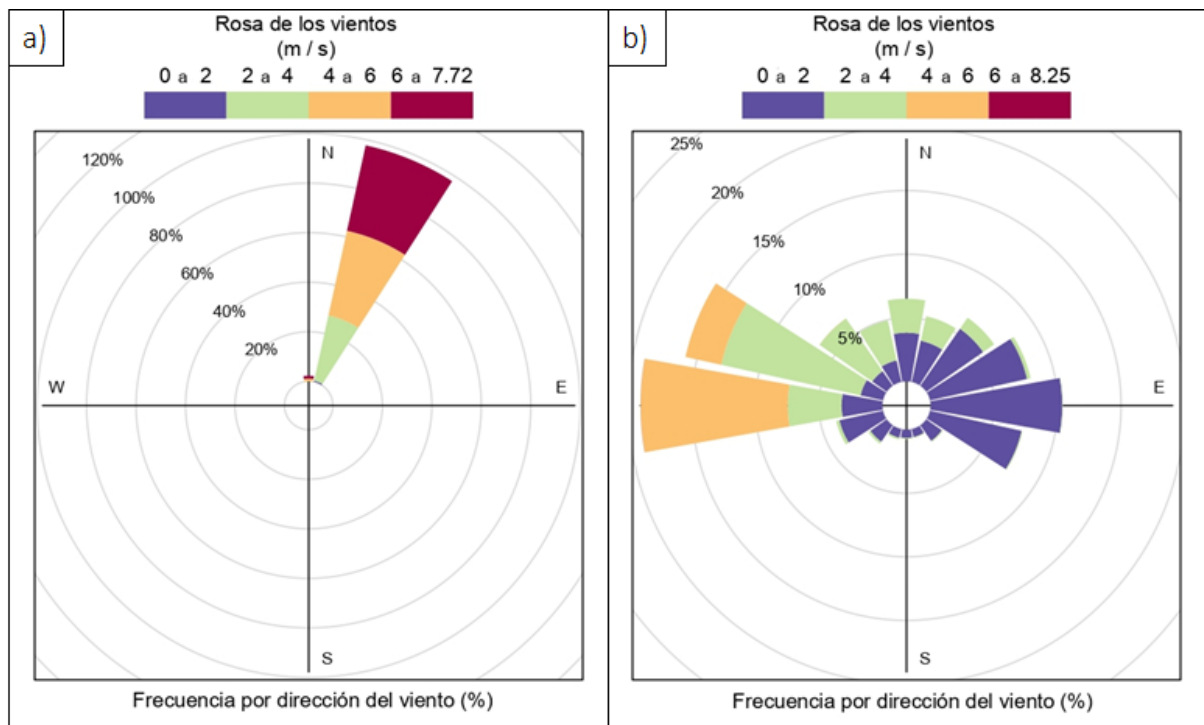


Figura 60. Frecuencias en las direcciones del viento medidas en estaciones de monitoreo automáticas: a) Puebla y b) La Malinche II. Elaborado con registros del viento en 90 días del Servicio Meteorológico Nacional (2021),

Es importante destacar que el uso de imágenes satelitales para la evaluación de contaminantes se realiza para extensiones mucho más amplias, ya que la resolución espacial de las imágenes utilizadas es de 1 Km por píxel. En nuestro caso, no era posible identificar las verdaderas emisiones que generan los sitios con RS al aire, pero con estas imágenes se pudo identificar si las ubicaciones de los sitios con RS contribuyen con las concentraciones de metano en la zona de estudio. Lo que resultó en que los sitios con RS contribuyen muy poco al total de metano en la región.

Discusión sobre el análisis estadístico de variables ambientales.

Análisis de componentes principales

Los resultados del ACP para las variables homologadas medidas dentro de los sitios con RS, muestra que las principales relaciones se dan entre el aumento de la temperatura y la degradación de la vegetación. Lo cual se puede deber al comportamiento térmico de los suelos desnudos, que incrementa la temperatura de la zona (Beaumont, B., Radoux, J., & Defourny, P. 2014). Además, se debe resaltar que no existe relación alguna entre la vegetación y la concentración de metano, ya que para las concentraciones de metano se cree que su comportamiento se debe principalmente a la topografía y viento en la zona de estudio.

Para el comportamiento de las variables medidas dentro de los sitios con RS, destacan los grupos 6, 12, 13, 14 y 15. Los cuales muestran un comportamiento similar en ambos ACP, lo que indica que estos grupos tienen condiciones más estables en comparación con los demás grupos. Lo que genera la idea de que estos sitios, han tenido el tiempo suficiente para ajustar sus efectos con las condiciones a su alrededor. Este caso es importante de destacar, ya que se podría indicar si los sitios ubicados con RS tienen poco tiempo de haber sido depositados al verificar si el comportamiento de las variables medidas se mantienen o cambian en diferentes fechas.

Uno de los principales factores que se observa en el comportamiento de los grupos, es que la ubicación de estos es clave para el comportamiento de las mediciones. Siendo que los grupos que presentan mayores concentraciones de metano, sólo se

encuentran en las zonas donde la acumulación del gas es mayor. Este factor de ubicación hace importante que se realicen en trabajos futuros, una inspección directa de estos grupos, para así verificar que las condiciones que presentan los sitios se deben principalmente a los efectos que generan los RS al ambiente y no sea por la ubicación donde se encuentran los RS.

En este trabajo de investigación, el ACP fue fundamentalmente útil para caracterizar el comportamiento de los sitios ubicados con RS, al simplificar las variables y mostrar relaciones entre los grupos. Pero se debe destacar que para cada grupo se tomó la media en cada una de las variables. Este hecho ayudó en la interpretación general de los sitios en el plano principal, pero es muy probable que se hayan ocultado algunos valores atípicos que pudieran representar sitios más afectados.

Regresión lineal de variables ambientales

Para realizar la regresión lineal de las variables ambientales en las regiones que concentran las ubicaciones de los RS, se extrajeron los valores mediante un mado de $750 m^2$, en cada una de las regiones que conforman el mapa de densidad. Es importante destacar que varias de las regiones que se estudiaron, poseen dos áreas separadas al norte y sur, con las mismas concentraciones de sitios con RS. Esto fue de gran ayuda para comparar los resultados de las regresiones lineales, ya que estos sitios contienen la misma presencia de sitios con RS.

Los resultados más importantes al aplicar la regresión lineal en las regiones del mapa de densidad, fue la identificación que la pérdida de la vegetación se asocia directamente con el aumento de la temperatura superficial en todas las regiones, lo que apoya la idea que los sitios con RS contribuye al aumento del impacto ambiental de la vegetación en la ciudad de Puebla. En cuestión a la relación de las variables de vegetación con la concentración de metano, se ha observado que en general para cada una de las zonas los valores de correlación son bajos y diferentes en cada región, lo que podría indicar que la presencia de metano no tiene relación con el deterioro de la vegetación, pero al evaluar el comportamiento por separado de las zonas norte y sur, se pudo apreciar que, en la parte norte, mientras más se aleja de su centro, la relación aumenta. Sin embargo, para la zona sur, se aprecia una relación

inversa entre estas variables, lo que indica que, en estas zonas con misma concentración de RS, las variables se comportan de forma diferente.

En la relación de la temperatura superficial con la concentración de metano, al analizar cada una de las regiones, se observa que mientras se aleja de la región con mayor concentración, se va aumentando el grado de relación de estas variables. Pero, al analizar cada una de las zonas por separado, se observó una relación inversa que va disminuyendo conforme uno se aleja del centro de la zona norte de la región 5 del mapa de densidad. Para la zona sur, se observa el caso contrario, donde la relación de la temperatura superficial con la concentración de metano es directa y se va incrementando conforme se aleja uno del centro de la zona sur. Estos cambios en la relación de las variables en cada una de las zonas norte y sur, apoya la idea que el comportamiento de las variables está influenciado principalmente por las áreas geográficas, y no por la presencia de los sitios con RS.

Capítulo 7: Conclusiones

Al inicio de este trabajo de investigación se planteó la hipótesis que al mapear los sitios con RS y medir las variables ambientales de vegetación, tipo de uso del suelo, temperatura superficial y calidad del aire por presencia de metano en la ciudad de Puebla mediante técnicas de PR y SIG, permitiría evaluar y determinar si la concentración de estos sitios mal gestionados, generan un impacto directo en las variables mencionadas, para así identificar zonas que necesiten de atención prioritaria y se mejoren las condiciones ambientales de la región y se evite la propagación de fuentes de infección a la población. Los resultados obtenidos mediante el uso de imágenes satelitales, en la zona A, del área de estudio permitió:

- 1) Ubicar 792 sitios con presencia de RS mal gestionados en la ciudad de Puebla. De los cuales, 348 sitios se encuentran en la zona A, formando dos grandes concentraciones en la parte norte y sur de dicha zona.
- 2) Mostrar que la mayoría de los sitios presentan afectaciones directas en la

vegetación, que se asocia en los principales tipos de suelo: suelo desnudo, suelo con poca vegetación y zona urbana. En los que se ubican los sitios con RS.

- 3) Identificar 159, 100 y 111 sitios que presentan una temperatura de superficie mayor a la media de toda la zona, para los años 2011, 2012 y 2019 respectivamente.
- 4) Ubicar que dentro de la zona A, las mayores concentraciones de metano se registran en la parte noreste y oeste, las cuales no se relacionan directamente por la presencia de los sitios con RS y pueden estar más relacionadas a la topografía y los vientos dominantes en la zona.
- 5) Relacionar mediante los dos análisis de componentes principales a los datos homologados de 2011, 2012 y 2019 y a los datos de 2019, que la degradación de la vegetación y el aumento de la temperatura superficial tienen una relación directa baja, la concentración de metano y la vegetación no están relacionadas, y que la temperatura y con el metano presentan una relación directa baja. Además, dentro del análisis se muestra que las mayores afectaciones en la vegetación se presentan en los sitios del grupo 15 y las temperaturas más altas con alta presencia de metano, se ubican en el grupo 13, para ambos ACP.
- 6) Medir la relación de las variables ambientales dentro de las regiones donde se concentran los RS. Donde se encontró una relación directa entre la pérdida de vegetación y el aumento de la temperatura en toda la zona A. Para la temperatura superficial y la concentración de metano, se muestran dos comportamientos para la parte sur y norte, que muestra una relación inversa baja en el norte que disminuye mientras se alejan del centro, y de la parte sur, que presenta el caso contrario, una relación directa baja que aumenta mientras se alejan de esta parte. Apoyando la idea que la concentración del metano en la zona se debe principalmente a la topografía, dirección del viento y a otros factores, que a la propia presencia de los sitios con RS.

Lo anterior permite confirmar que el uso de la PR muestra ser una gran herramienta

para la identificación de áreas afectadas por la contaminación, en grandes extensiones. Y que con la cual, se logró identificar la presencia de los sitios con RS mal gestionados en la ciudad de Puebla, los cuales presentan un impacto directo en la vegetación y temperatura superficial. Siendo la parte norte y sur de la ciudad, las zonas que contienen la mayor densidad de sitios con RS, las cuales deben ser las principales zonas para actuar, en favor al mejoramiento de las condiciones ambientales de la zona y así también para evitar la exposición de la población a fuentes de infección.

Se recomienda que en trabajos futuros se realicen inspecciones directas sobre los sitios que muestran los mayores impactos ambientales, fuera de las zonas de mayor densidad de sitios con RS. Para así, descartar posibles errores en las mediciones y confirmar que las características de los sitios con RS presenten un alto impacto ambiental, y así también dirigir los esfuerzos a estos sitios para mitigar los impactos ambientales fuera de las zonas con mayor cantidad de sitios.

Bibliografía

- Banco Interamericano de Desarrollo. (2015). *Situación de la gestión de residuos sólidos en América Latina y el Caribe*. Banco Interamericano de Desarrollo. <https://publications.iadb.org/es/situacion-de-la-gestion-de-residuos-solidos-en-america-latina-y-el-caribe>
- Beaumont, B., Radoux, J., & Defourny, P. (2014). Assessment of airborne and spaceborne thermal infrared remote sensing for detecting and characterizing landfills. *Waste Management and The Environment VII*, 180, 237-248.
- Bolstad, P. (2016). *GIS fundamentals: A first text on geographic information systems*. Eider Press.
- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2018, 19 de enero). Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. México: Diario Oficial de la Federación.
- Chander, G., Markham, B. L., & Helder, D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote sensing of environment*, 113(5), 893-903.
- Chandrappa, R., & Das, D. B. (2012). *Solid waste management: Principles and practice*. Springer Science & Business Media.
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Ediciones Rialp, SA.
- Congedo, L. (2016). *Semi-automatic classification plugin user manual*. Technical Report.
- Díaz-Archundia, L. V., Buenrostro-Delgado, O., Mañón-Salas, M. D. C., & Hernández-Berriel, M. D. C. (2017). Emisión de gases de efecto invernadero en dos sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos en México. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 18(2), 149-159.

- Elachi, C., & Van Zyl, J. (2006). *Introduction to the physics and techniques of remote sensing*. John Wiley & Sons.
- Faisal, K. S. (2011). Environmental monitoring of landfill sites using multi-temporal remote sensing images. *Ryerson University*, 1-78.
- Galicia, L., García, R. A., Gómez-Mendoza, L., & Ramírez, M. I. (2007). Cambio de uso del suelo y degradación ambiental. *Ciencia*, 58(4), 50-59.
- Godish Thad. (2003). *Air Quality*. 4th Edition. Lewis Publishers.
- Gómez, R. A. (2009). *Conceptos de Geomática y estudios de caso en México*. Instituto de Geografía, UNAM.
- Gorgas-García, J., Cardiel-López, N., & Zamorano-Calvo, J. (2009). *Estadística básica para estudiantes de ciencias*. Universidad Complutense de Madrid.
- Henry, J. G., & Heinke, G. W. (1999). *Ingeniería ambiental*. Pearson Educación.
- Iglesias, E. O. C. (2016). *Aplicación de percepción remota para el estudio de áreas con un potencial geotérmico: La Sociedad (Jalisco) y los Negritos (Michoacán)*. (Tesis de maestría). Centro de Investigación en Geografía y Geomática Ing. Jorge L. Tamayo, AC Centrogeo. México.
- Instituto Municipal de Planeación Puebla. (2019). *Plan de Desarrollo Municipal 2018-2021*. Instituto Municipal de Planeación Puebla. https://gobiernoabierto.pueblacapital.gob.mx/transparencia_file/implan/77.fracc01/77.01.implan.plan.mpal.desarrollo.18.21.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2021). *Censo de población y vivienda 2020. Tabulados del Cuestionario Básico de población de Puebla*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/default.html#Tabulados>
- Jolliffe, I. T. (2002). *Principal component analysis*. Springer-Verlag New York: Springer.

- Jordá Borrell, R. M., Ruiz Rodríguez, F., & Lucendo Monedero, Á. L. (2013). Factores territoriales de localización y caracterización de los vertederos incontrolados en Andalucía. *Scripta Nova: Revista electrónica de geografía y ciencias sociales*, (17), 425-462.
- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050*. World Bank Publications.
- Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J. (2015). *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley & Sons.
- Mahmood, K., Batool, S. A., & Chaudhry, M. N. (2016). Studying bio-thermal effects at and around MSW dumps using Satellite Remote Sensing and GIS. *Waste management*, 55, 118-128.
- Marcial, N. (19 de marzo de 2018). Tiraderos clandestinos, foco rojo para la salud de poblanos. *El Sol de Puebla*. <https://www.elsoldepuebla.com.mx/local/tiraderos-clandestinos-foco-rojo-para-la-salud-de-poblanos-1330997.html>
- Marcial, N. (19 febrero de 2019). Camino Real a Xoxtla, tiradero clandestino. *El Sol de Puebla*. <https://www.elsoldepuebla.com.mx/local/camino-real-a-xoxtla-tiradero-clandestino-puebla-3078944.html>
- Mirón, M. A. (27 de junio de 2018). Detecta Comuna de Puebla 21 tiraderos de basura clandestinos. *El Sol de Puebla*. <https://www.elsoldepuebla.com.mx/local/detecta-comuna-de-puebla-21-tiraderos-de-basura-clandestinos-1796085.html>
- Organización Meteorológica Mundial. (20 de noviembre 2018). *Los niveles de gases de efecto invernadero en la atmósfera alcanzan un nuevo récord*. Organización Meteorológica Mundial. <https://public.wmo.int/es/media/comunicados-de-prensa/la-concentraci%C3%B3n-de-gases-de-efecto-invernadero-en-la-atm%C3%B3sfera-alcanza>

- Pastrana, O. P. (2011). *Análisis de cambio de uso de suelo mediante percepción remota en el municipio de Valle de Santiago* (Tesis de doctorado). Centro de Investigación en Geografía y Geomática Ing. Jorge L. Tamayo, AC Centrogeo. México.
- Pérez, G. B. (2012). El confinamiento de la basura urbana y la contaminación de las fuentes de agua en México. *Revista de El Colegio de San Luis*, 2(4), 36-53.
- Pérez-Vega, A., Regil García, H. H., & Mas, J. F. (2020). Degradación ambiental por procesos de cambios de uso y cubierta del suelo desde una perspectiva espacial en el estado de Guanajuato, México. *Investigaciones geográficas*, (103).
- Reddy, M. A. (2008). *Textbook of remote sensing and geographical information systems*. BS publications.
- Richards, J. A., & Jia, X. (2006). *Remote sensing digital image analysis*. Springer.
- Rizzatti, M., Lampert Batista, N., Cezar Spode, P. L., Bouvier Erthal, D., Mauro de Faria, R., Volpato Scotti, A. A., Trentin, R., Petsch, C., Turba Costa, I., & Quoos, J. H. (2020). Mapeamento da COVID-19 por meio da densidade de Kernel. *Metodologias E Aprendizado*, 3, 44–53.
- Román, E. (16 de noviembre de 2020). Exceso de cascajo en barrancas de Puebla crea zonas de infección. *E-Consulta.Com*. <https://www.e-consulta.com/nota/2020-11-16/ciudad/exceso-de-cascajo-en-barrancas-de-puebla-crea-zonas-de-infeccion>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2020). *Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos*. Ciudad de México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales & Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2018). *Inventario nacional de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero, 1990-2015*. Ciudad de México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales e Instituto Nacional de Ecología.

- Servicio Meteorológico Nacional. (2019, mayo). *Monitor de sequía de México*. Servicio Meteorológico Nacional. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico>
- Servicio Meteorológico Nacional. (2021, octubre). *Estaciones meteorológicas automáticas*. Servicio Meteorológico Nacional. <https://smn.conagua.gob.mx/es/observando-el-tiempo/estaciones-meteorologicas-automaticas-ema-s>
- Silvestri, S., & Omri, M. (2008). A method for the remote sensing identification of uncontrolled landfills: formulation and validation. *International Journal of Remote Sensing*, 29(4), 975-989.
- Singh, A. (2019). Remote sensing and GIS applications for municipal waste management. *Journal of environmental management*, 243, 22-29.
- Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C., & Paolini, L. (2004). Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of environment*, 90(4), 434-440.
- U.S Geological Survey. (2019). *Landsat 7 Data Users Handbook*. https://prd-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/LSDS-1927_L7_Data_Users_Handbook-v2.pdf
- Vergara, S. E., & Tchobanoglous, G. (2012). Municipal solid waste and the environment: a global perspective. *Annual Review of Environment and Resources*, 37, 277-309.
- Yang, K., Zhou, X. N., Yan, W. A., Hang, D. R., & Steinmann, P. (2008). Landfills in Jiangsu province, China, and potential threats for public health: Leachate appraisal and spatial analysis using geographic information system and remote sensing. *Waste Management*, 28(12), 2750-2757.