

UNIVERSIDAD ESTATAL DE SONORA
UNIDAD ACADÉMICA HERMOSILLO
MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES



EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CRECIMIENTO DE HERMOSILLO EN EL
AMBIENTE URBANO

TESIS.

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS AMBIENTALES

PRESENTA:

HAZELL ALICIA ARREOLA OCHOA

ASESOR

DRA. CARMEN ISELA ORTEGA ROSAS

HERMOSILLO, SON.

Junio, 2023



UNIVERSIDAD ESTATAL DE SONORA

FORMATO F6

ACTA DE LIBERACION DE TESIS
PROCEDIMIENTO PARA LA OBTENCION DEL GRADO DE MAESTRO,
OPCION TESIS

Los miembros del Comité de Tesis de la alumna HAZELL ALICIA ARREOLA OCHOA recomendamos que el documento titulado: "EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CRECIMIENTO DE HERMOSILLO EN EL AMBIENTE URBANO" sea aceptado como Requisito Parcial para obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS AMBIENTALES.

COMITE DE TESIS

Ora. Carmen Isela Ortega Rosas
Director

Dr. Alberto Macías Duarte
Sinodal

Dr. Oscar Gerardo Gutiérrez Ruacho
Sinodal

Dr. Daniel Morales Romero
Sinodal

Hermosillo, Sonora a 23 de Junio 2023

Agradecimiento

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que contribuyeron de manera significativa al desarrollo y éxito de este proyecto de investigación. Sus apoyos y colaboraciones fueron fundamentales para alcanzar nuestros objetivos y obtener resultados significativos.

En primer lugar, agradezco a la Universidad Estatal de Sonora por brindarme la oportunidad de realizar esta investigación. Su respaldo y recursos proporcionados han sido indispensables para llevar a cabo este trabajo. Asimismo, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por su apoyo financiero a través de la beca otorgada durante la realización de este proyecto. Su respaldo ha sido fundamental para su realización.

Un especial agradecimiento a Joel Zepeda y Martin Campa por su generosa contribución al proporcionar los datos del Programa de Evaluación y Mejoramiento de la Calidad del Aire (PEMCA). Sus datos fueron fundamentales para la realización de este estudio.

También deseo expresar mi más profundo agradecimiento a mi comité de investigación, el Dr. Daniel Morales Romero, el Dr. Alberto Macias Duarte y el Dr. Oscar Gerardo Gutiérrez Ruacho. Su guía, conocimientos y sugerencias críticas han enriquecido enormemente este proyecto y han sido un apoyo constante a lo largo del proceso.

Agradezco especialmente a mi asesora, la Dra. Carmen Isela Ortega Rosas. Su orientación experta, paciencia y compromiso han sido fundamentales en cada etapa de este proyecto. Sus consejos y comentarios han sido invaluable para su desarrollo.

A Jesús Cázares por su valioso apoyo y experiencia en la representación cartográfica, fueron indispensables para la visualización y comprensión de los resultados obtenidos. Su contribución ha sido de gran importancia y se agradece enormemente.

A Claudia Peon por su inestimable ayuda y apoyo logístico. Su contribución y esfuerzos han hecho que mi vida sea más sencilla durante el desarrollo de esta investigación, siempre estaré agradecida por ello.

No puedo dejar de mencionar a mi equipo de trabajo, Unisolar Team. Quiero expresar mi profundo agradecimiento a cada uno de sus miembros por su dedicación y excelencia en su labor. Su trabajo en equipo, profesionalismo y entusiasmo han sido una pieza clave en el éxito de este proyecto.

A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento. Sin su colaboración, este proyecto no habría sido posible.

Dedicatoria

Dedico este trabajo de investigación a mi amada familia, quienes han sido mi mayor inspiración y apoyo a lo largo de este camino académico. Su amor incondicional y aliento constante han sido pilares fundamentales en mi crecimiento y logros.

Asimismo, dedico este trabajo a todas aquellas personas que, de alguna manera, puedan hacer uso de la información contenida en este documento. Mi deseo es que esta investigación sea una fuente de conocimiento útil y aplicable, con el propósito de contribuir a la creación de un mundo mejor.

Que cada página de este trabajo sea un llamado a la acción y a la reflexión, y que los hallazgos aquí presentados sirvan como base para generar cambios positivos en nuestra sociedad y en nuestro entorno.

ÍNDICE

<i>Agradecimiento</i>	2
<i>Dedicatoria</i>	3
<i>ÍNDICE</i>	4
<i>ÍNDICE DE TABLAS</i>	6
<i>ÍNDICE DE FIGURAS</i>	7
<i>RESUMEN</i>	9
<i>INTRODUCCIÓN</i>	11
<i>MARCO TEÓRICO</i>	13
1. Cambio climático y crecimiento urbano	13
2. Clima en zonas urbanas.....	15
3. Calidad el aire en las ciudades	16
4. Crecimiento Urbano e Impactos en el Ambiente.....	18
5. Vegetación Urbana y Servicios Ambientales	21
<i>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</i>	23
<i>JUSTIFICACIÓN</i>	25
<i>HIPÓTESIS</i>	26
<i>OBJETIVOS</i>	27
Objetivo General.....	27
Objetivos Específicos	27
<i>METODOLOGÍA</i>	28
1. Descripción del Área de Estudio	28
1.1 Clima.....	29
1.2 Calidad del aire	30
1.3 Crecimiento Urbano.....	30
1.4 Vegetación.	30
2. Métodos y Técnicas De Recolección De Datos	31
2.1. Clima: Estaciones meteorológicas.....	32
2.2. Calidad del aire.....	34
2.3. Crecimiento urbano	37

2.4.	Cobertura arbórea	38
2.5.	Definición de la muestra.....	41
3.	Plan De Tabulación Y Análisis De Datos	46
4.	Metodología estadística.....	47
RESULTADOS.....		48
1.	Clima	48
1.1.	Temperatura.....	49
1.2.	Precipitación y Humedad.	52
1.3.	Velocidad, dirección y frecuencia del viento.	56
1.4.	Radiación Solar.	61
2.	Calidad del aire	62
2.1.	Estaciones PEMCA	62
2.2.	Estaciones de particulado atmosférico instalados en este proyecto.....	65
3.	Crecimiento Urbano.....	74
4.	Cobertura Arbórea	83
5.	Análisis estadísticos.....	88
DISCUSIONES		97
1.	Crecimiento urbano y expansión poblacional de la ciudad de Hermosillo	97
2.	Calidad del aire de Hermosillo respecto a la concentración de las partículas suspendidas PM₁₀ y su relación con variables meteorológicas.....	102
3.	Cobertura arbórea del poniente de la ciudad	109
4.	Impacto en el ambiente de Hermosillo por el crecimiento urbano.	110
CONCLUSIONES.....		112
RECOMENDACIONES		114
LITERATURA CITADA.....		116
Anexo 1: Plan de Vuelo.....		120
	Cálculo de la malla.....	120
	Tiempo de vuelo.	123
	Ejecución de Vuelo.....	124
Anexo 2: Métodos de análisis de la expansión urbana de la ciudad.....		126

<i>Anexo 3. Perfil de elevaciones.</i>	128
<i>Anexo 4: Predicción por muestra de temperatura y PM10.</i>	130
<i>Anexo 5: Consulta de las Unidades Económicas de la zona poniente en DENU.</i>	132
<i>Anexo 6: Tablas de Resultados</i>	135
<i>Anexo 7: Gráficas</i>	145

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1 Especificaciones técnicas de la Norma Oficial Mexicana Vigente para PM₁₀.</i>	17
<i>Tabla 2 Ubicación de estaciones de monitoreo climático.</i>	32
<i>Tabla 3. Ubicación de estaciones de muestreo de partículas suspendidas.</i>	36
<i>Tabla 4 - Plan de tabulación y análisis de datos.</i>	46
<i>Tabla 5 Promedios mensuales de PM₁₀ en la estación UES (norte).</i>	63
<i>Tabla 6 Promedio mensual de PM₁₀ de la Estación COBACH (sur).</i>	64
<i>Tabla 7 Promedio mensual de PM₁₀ de la estación Villa Bonita (sur-poniente).</i>	65
<i>Tabla 8 Poniente. Promedios mensuales de PM₁₀ por hora.</i>	66
<i>Tabla 9 Promedios mensuales de PM₁₀ por hora.</i>	70
<i>Tabla 10 Resumen de los promedios mensuales PM₁₀, PM_{2.5} y PM₁.</i>	72
<i>Tabla 11 Zonas de crecimiento durante el periodo 1990-2018.</i>	77
<i>Tabla 12 Coeficientes de un modelo de regresión lineal múltiple de partículas PM₁₀.</i>	89
<i>Tabla 13 Coeficientes de un modelo de regresión lineal múltiple para Temperatura.</i>	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Sistemas de presión atmosférica que influyen el clima en la ciudad.....	15
Figura 2 Crecimiento de la ciudad de Hermosillo.	20
Figura 3 Ubicación del área urbana de Hermosillo, Sonora.	28
Figura 4 Densidad de población de Hermosillo, Sonora.	29
Figura 5 Diagrama General de análisis de correlación de los parámetros.	32
Figura 6 Estación de monitoreo Ambient Weather WS – 2000.	33
Figura 7. Muestreador de alto volumen wedding 600.	35
Figura 8 Estación Airlink, Davis.....	35
Figura 9. Ubicación de estaciones sobre los límites de crecimiento urbano 1990 – 2020.....	37
Figura 10 Concentración de PST.	42
Figura 11 Isotermas de temperatura.....	43
Figura 12. Unidades de muestreo (hexágonos) en la zona poniente de la ciudad.	45
Figura 13. Temperaturas máximas y mínimas 1966–2020 (54 años) en Hermosillo.	48
Figura 14. Poniente. Temperatura máximas/promedios/mínimas.	50
Figura 15. Norponiente, Temperatura máximas/promedios/mínimas.	51
Figura 16. Comportamiento de la temperatura entre las diferentes estaciones.	52
Figura 17. Poniente. Promedio (Prom.Hum), máximos (Max.Hum) y mínimos (Min.Hum) mensuales de Humedad y llluvias.....	53
Figura 18 Norponiente. Promedio (Prom.Hum), máximos (Max.Hum) y mínimos (Min.Hum) mensuales de Humedad y llluvias.	54
Figura 19. Comportamiento de Promedios, máximos y mínimos mensuales entre la Estaciones para los parámetros de Precipitación y Humedad.	55
Figura 20 Poniente. Dirección, velocidad del viento mensual.	56
Figura 21 Poniente. Frecuencia de la Dirección de viento.	57
Figura 22 Norponiente. Dirección y velocidad del viento registrados.	59
Figura 23 Norponiente. Dirección de la frecuencia del viento.....	60
Figura 24 Promedios de Radiación solar mensual.....	61
Figura 25 Poniente. Máximas y promedios de PM ₁₀	67
Figura 26 Poniente. Máximas y promedios de PM _{2.5}	67
Figura 27 Poniente. Máximas y promedios de PM ₁	68
Figura 28 Poniente. Máximas y promedios de 17 de septiembre al 17 de octubre.....	68
Figura 29 Máximas y promedios del 17 de septiembre a 1 de octubre de PM ₁₀ y PM _{2.5}	69
Figura 30 Poniente. Máximas y promedios de particulado durante el día 18 de septiembre.	69
Figura 31 Máximas y promedios de PM ₁₀	71

Figura 32 Estación Norponiente. Máximas y promedios de $PM_{2.5}$	71
Figura 33 Estación Norponiente. Máximas y promedios de PM_{10}	72
Figura 34 Promedios mensuales de la estación Poniente y Norponiente.....	73
Figura 35 Panorámica de dron sobre zona de estudio, vista de poniente a oriente.	74
Figura 36 Crecimiento de la Ciudad 1990-2018.	75
Figura 37 Zonas de crecimiento por periodo, 1990-2018.....	76
Figura 38 Crecimiento poblacional y urbano de la ciudad de Hermosillo en el periodo 2016 – 2021.....	78
Figura 39 Mapa del crecimiento urbano del periodo 2016 - 2021 de la ciudad de Hermosillo.....	79
Figura 40 Crecimiento Urbano. Mapa que refleja la expansión urbana durante el periodo 2016 – 2022.	81
Figura 41 Crecimiento urbano anual por polígono muestra durante el periodo 2016 – 2022.	82
Figura 42 Comportamiento de la cobertura arbórea anual por muestra 2016-2022.	84
Figura 43 Mapa de ubicación de las muestras de cobertura arbórea.....	85
Figura 44 Resultado de muestra de Cobertura Arbórea a partir de vuelo de dron (muestra 186).....	86
Figura 45 El mapa representa la diferencia de cobertura arbórea en el periodo 2016-2022.	87
Figura 46 Efectos de la cobertura vegetal (gráfica superior) y la cobertura urbana (gráfica inferior) sobre PM_{10} para el mes de enero (este y oeste).	91
Figura 47 Efectos de la cobertura vegetal (gráfica superior) y la cobertura urbana (gráfica inferior) sobre PM_{10} para el mes de enero (sur y norte).....	92
Figura 48 Efectos de la cobertura vegetal (gráfica superior) y la cobertura urbana (gráfica inferior) Sobre la temperatura media para el mes de enero (este y oeste).....	95
Figura 49 Efectos de la cobertura vegetal (gráfica superior) y la cobertura urbana (gráfica inferior) sobre la temperatura media para el mes de enero (sur y norte).	96
Figura 50 Crecimiento Urbano de la ciudad de Chihuahua, Chihuahua.....	98
Figura 51 Crecimiento Urbano de Ciudad de Saltillo.....	99
Figura 52 Crecimiento Urbano de la Ciudad de Mexicali.	100
Figura 53 Elevación y topografía entre estación poniente y norponiente.....	103
Figura 54 Tendencia de los valores de material particulado PM_{10}	104
Figura 55 Tendencia de los valores de temperatura en la zona poniente.	105
Figura 56 Unidades Económicas cuyas actividades afectan negativamente la calidad del aire.	106

RESUMEN

Es preciso observar el desarrollo de las ciudades sobre los efectos en el ambiente y la salud humana para poder planificar ciudades sanas, inteligentes y resilientes que aporten calidad de vida y menos problemas a generaciones futuras. En el 2016 se dio a conocer que el 90% de los habitantes de las ciudades respiraban aire que no cumplía con las normas de seguridad que establece la Organización Mundial de la Salud, identificando a las partículas suspendidas en el ambiente menores a 10 μm de diámetro (PM_{10}) como riesgosas para la salud. Ese mismo año se estimó 4.2 millones de muertes asociadas a la calidad del aire. La presente investigación tuvo como objetivo evaluar el impacto del crecimiento de la ciudad de Hermosillo en el ambiente urbano a partir del análisis de temperatura, partículas suspendidas PM_{10} , expansión de la mancha urbana y cobertura vegetal de los últimos 7 años para su uso en la toma de decisiones para la gestión del desarrollo urbano en la ciudad. Se analizaron datos climáticos históricos de la estación 26139 Hermosillo II, concentración de PM_{10} a partir de información del programa municipal de calidad del aire de Hermosillo (PEMCA), imágenes satelitales históricas que por fotointerpretación se extrajo información de la expansión urbana de la ciudad. Adicionalmente instalamos diversos sensores para generar datos más precisos sobre calidad del aire y climatología durante 1 año al poniente de la ciudad en dos estaciones de PM_{10} (*AIRLINK DAVIS*) y dos estaciones para registro de parámetros climáticos (*ambient weather WS-2000*) así como la toma de muestras a partir de vuelos de Drone (*MAVIC AIR DJI*) y clasificación de la nube densa de puntos por su banda espectral NDVI para identificar el área de cobertura vegetal. La expansión territorial casi duplica la huella urbana 1.97 veces, 2.57 veces el número de vivienda de 1990 a 2020, siendo la zona norte la de mayor crecimiento seguida de la zona poniente, que corresponden con áreas vulnerables a altas concentraciones de PST y PM_{10} . De la información de las estaciones PEMCA, los valores más altos obtenidos para el análisis anual se dieron en la estación Noroeste en el año 2000 ($94 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 2001 ($80 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y 2002 ($75 \mu\text{g}/\text{m}^3$), así como en la estación Sur en el 2007 ($93 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y 2008 ($76 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Nuestros sensores instalados en la zona poniente indican valores promedios de PM_{10} en 24h de $137 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con un valor promedio anual de $44.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio anual. Los valores más altos de PM_{10} se registraron en los meses de invierno con una variación intradiaria considerable. La estación poniente presenta su pico más alto en concentraciones entre la 1 y 3 am, y el norponiente entre las 7 y 9 am. los resultados del cálculo de cobertura arbórea con dron para la zona poniente nos indica que algunos puntos presentaron un aumento de cobertura arbórea de entre

0.23% hasta 5.63%, mientras que otros puntos del poniente presentaron una reducción del 9%. Análisis de regresión lineal múltiple nos indican que la cobertura urbana y la cobertura de vegetación tienen un efecto sobre la concentración de partículas suspendidas y la temperatura media diaria: el aumento de cobertura arbórea en el poniente disminuye la concentración de PM_{10} . Esta variación depende de los meses del año y la ubicación. De manera general esta asociación es negativa para PM_{10} . En el caso de la temperatura promedio diaria la asociación es negativa, concluyendo que nuestra hipótesis planteada es correcta, ya que los datos nos muestran evidencia contundente que existe un efecto del crecimiento urbano en el aumento de PM_{10} para algunos puntos de la zona poniente de la ciudad, así mismo la disminución de cobertura arbórea de entre 4 a 9% en algunos puntos del poniente incrementa la temperatura promedio diaria. De esta forma, es preciso tomar acciones de mejor planeación del crecimiento urbano de la ciudad y de reforestación para mejorar el ambiente urbano.

INTRODUCCIÓN

Es preciso observar el desarrollo de la ciudad sobre los efectos en el ambiente y la salud humana para poder planificar ciudades sanas, inteligentes y resilientes que aporten calidad de vida y menos problemas a generaciones futuras.

Desde los compromisos adquiridos con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) se han venido dando cambios en el marco jurídico y normativo que han penetrado en todos niveles de gobierno para regular las actividades y cumplir con los ODS. Recién en 2017 se integró el tema de Cambio climático en la Guía Metodología para la Elaboración y Actualización de Programas municipales de desarrollo, misma que integra el estudio de emisiones de gases efecto invernadero (GEI) y partículas suspendidas a la planeación de las ciudades (Marambio-Castillo, et al., 2017).

Gracias a los registros cartográficos e imágenes satelitales podemos estudiar la evolución que ha experimentado el suelo de la ciudad de Hermosillo, y gracias a los sistemas de monitoreo climático somos capaces de estudiar más de 33 parámetros atmosféricos, patrones particulares de comportamiento, ciclos, anomalías y hasta predicción. En suma, es posible evaluar el proceso de expansión y el impacto sobre el ambiente urbano que se ve reflejado en las variables de temperatura y partículas suspendidas (WindY, 2021).

Los climas extremos y las partículas suspendidas en el ambiente desértico son parámetros que influyen en la salud humana que ha sido señalado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) (OMS, 2006), también se ve relacionado indirectamente con la depresión, preocupación o pandemias.

La vulnerabilidad de las ciudades ante cualquier cambio y los retos a los que se enfrenta la sociedad actual son el resultado de un acelerado crecimiento poblacional y del deterioro del ambiente urbano (OECD, 2020). Los principales problemas ambientales que se enfrentan en las ciudades son la mala calidad del aire, el aumento de temperaturas, la ocurrencia de olas de calor atípicas, la deforestación o introducción de especies exóticas que reducen la diversidad natural de plantas (IPCC, 2021). Todo lo anterior conlleva a una problemática que se agrava año con año relacionado con la Salud ambiental en las ciudades. La mala calidad ambiental puede generar problemas a la salud o agravar enfermedades ya existentes en la población (OMS, 2021). Según

estimaciones de 2016, la contaminación atmosférica en las ciudades y zonas rurales de todo el mundo provoca cada año 4,2 millones de defunciones prematuras (OMS 2021).

En este sentido la ciudad de Hermosillo, Sonora es considerada una de las zonas más vulnerables de México por su condición desértica (Gay-García et al., 2015). Además, concentra la mayor parte de la población del estado de Sonora. Las ciudades son espacios vulnerables, pues mitad de la población vive en las ciudades y se estima que en 2050 incremente en un 40% mas (OECD, 2020). Esta gran concentración de personas y actividades convierte a las zonas urbanas en las áreas donde las transformaciones del medio natural han sido más evidentes, afectando incluso a la salud ambiental y al clima. Todo ello se traduce en un clima urbano con isla de calor, que se agrava con la ocurrencia de olas de calor cada vez más extremas en relación a las áreas no urbanas (OECD, 2020).

Anteriormente se realizaron estudios en la ciudad de Hermosillo, que resultan valiosos para la presente investigación, como la Morfología de la isla de calor urbana de Mercado y Marincic, 2017, la Correlación de la cobertura vegetal y las variables medioambientales de Ortega-Rosas, et al., 2020.

La importancia de esta investigación reside en la necesidad de generar herramientas para la toma de mejores decisiones en cuanto a la gestión de los recursos disponibles actualmente sin comprometer su disponibilidad para generaciones futuras. Eligiendo así los modelos de crecimiento y desarrollo sostenible que garanticen la calidad de vida de los habitantes.

MARCO TEÓRICO.

1. Cambio climático y crecimiento urbano

El aumento de la temperatura media en el planeta (calentamiento global), provoca cambios en el estado del sistema climático (formado por la atmósfera, hidrosfera, criósfera, litosfera y biosfera), a estas alteraciones se le conoce como cambio climático, evidencia del cambio en el clima están: la disminución de la superficie terrestre cubierta por nieve o hielo, reducción del periodo de congelamiento de ríos, aumento en el nivel medio del mar, cambios en los patrones de precipitación, velocidad de los vientos, nubosidad y frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos, como el fenómeno de “el niño” y “la niña” durante el siglo XX. La relevancia reside en saber identificar los patrones del cambio climático a escala urbana (González, et al., 2003).

El desarrollo de indicadores ambientales y de sustentabilidad en México en 2008 menciona que se basan en un marco de referencia, conceptuales y metodológicos, en los que se han desarrollado los instrumentos del Sistema Nacional de Indicadores Ambientales (SNIA) y los Indicadores Básicos de Desempeño Ambiental de SEMARNAT, metodología de los indicadores de desempeño del Ordenamiento Ecológico del Territorio (OET) para fundamentar los indicadores que presenta. Aborda la idea compartida de una visión de comunicación efectiva con la información y transformarla tanto por la sociedad civil como los tomadores de decisiones de un conjunto de datos en acciones específicas (López-Blanco y Rodríguez-Gamiño, 2008).

El marco para la evaluación de sistemas de manejo incorpora indicadores de sustentabilidad (MESMIS) es una herramienta metodológica que ayuda a evaluar la sustentabilidad de sistemas de manejo de recursos naturales

Mambrambio – Castillo, 2017, plantea en la guía metodología para la elaboración de programas municipales de desarrollo vigente, la incorporación en el diagnóstico el uso de la información del monitoreo de partículas suspendidas y emisiones GEI, el tema de cambio climático, que analiza el inventario de GEI, calidad del aire, mitigación, impactos, adaptación y vulnerabilidad. La gestión actual del territorio influye en las variaciones climáticas de pequeña escala y es indispensable contar con la información para guiar el crecimiento de las ciudades y valorar sus recursos. El

contenido se considera relevante ya que la investigación y el enfoque de la guía es contar con información para la toma de decisiones y planeación del territorio

Gifreu – Font, 2017, presenta ciudades sostenibles definidas por la interacción de tres indicadores: eficiencia económica, bienestar ciudadano y protección ambiental. El desarrollo urbano sostenible es un objetivo en sí mismo y a la vez, especialmente en su vertiente ecológica, un punto estratégico para prevenir y mitigar los efectos del cambio climático. Las instituciones y gobiernos nacionales e internacionales se han volcado en reforzar la contribución de las políticas medioambientales al desarrollo sostenible del planeta. Pero para conseguir beneficios globales es importante actuar localmente. En un contexto de creciente concentración de la población mundial en áreas urbanas, las ciudades desempeñan un papel clave en la lucha contra el cambio climático, y no solo en su vertiente de mitigación o reducción de la severidad de los futuros impactos. El cambio climático ha aumentado la exposición de las ciudades a amenazas derivadas del mismo y, en consecuencia, la gestión del riesgo de desastres y la resiliencia deben integrarse en el diseño de políticas urbanas como parte de una estrategia global para alcanzar un desarrollo sostenible y garantizar la equidad intergeneracional.

Las Naciones Unidas en 2018, presentó el sistema de evaluación por medio de indicadores para los objetivos y metas de la ODS, donde metodológicamente interesa evaluar el Objetivo 11) Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles, en la meta 11.3 De aquí a 2030, aumentar la urbanización inclusiva y sostenible y la capacidad para la planificación y la gestión participativas, integradas y sostenibles de los asentamientos humanos en todos los países, mismo que se evaluara con el indicador 11.3.1 Relación entre la tasa de consumo de tierras y la tasa de crecimiento de la población; y 11.3.2 Proporción de ciudades que cuentan con una estructura de participación directa de la sociedad civil en la planificación y la gestión urbanas y funcionan con regularidad y democráticamente, mismo que es de competencia nacional. A esta escala solo plantea la presencia o ausencia de la estructura de participación. Funciona como un punto de referencia para comprar otras ciudades a nivel mundial, y poder cuantificar un avance en las metas de la ODS

2. Clima en zonas urbanas

La ciudad de Hermosillo se encuentra en la zona árida del estado, con una gradiente de pendiente que va desde la Sierra Madre Occidental hacia el Golfo de California. Se encuentra en la Zona Intertropical de Convergencia, por lo que el clima se ve influenciado por sistemas de alta presión de mayor escala, uno localizado en el Pacífico Oriental y otra sobre las Islas Bermuda que controlan las características de temperatura y precipitación a lo largo del año. Cualquier cambio en estos sistemas de presión y alteran la variabilidad de lluvias o sequías ya que pueden persistir por años (Brito-Castillo & Díaz, 2010).

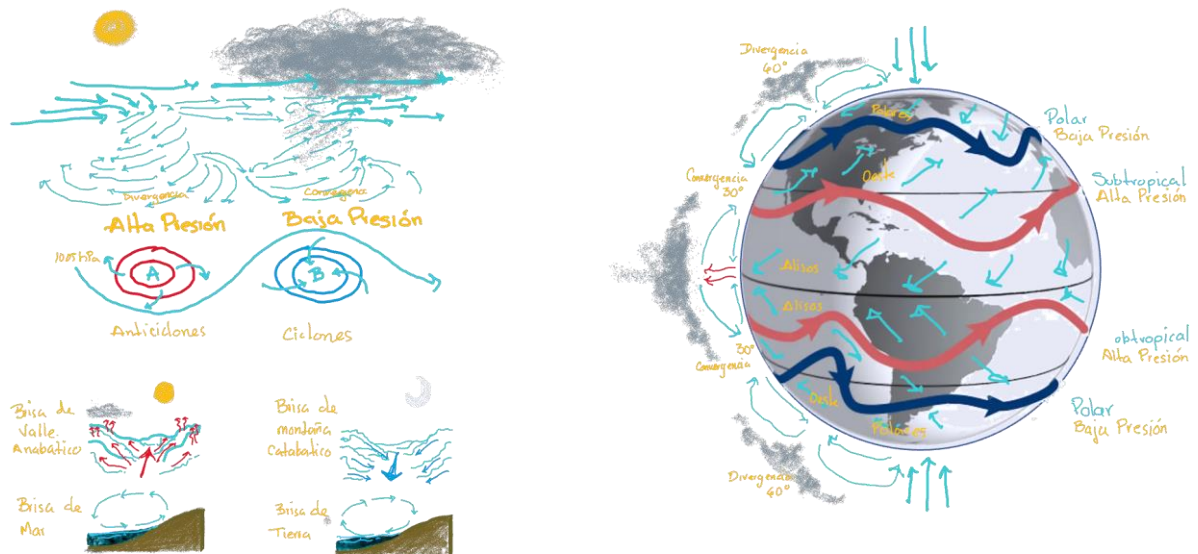


Figura 1 Sistemas de presión atmosférica que influyen el clima en la ciudad.

La precipitación es más abundante en verano entre los meses de julio y septiembre debido al Monzón Norteamericano, y en menores cantidades durante el invierno de diciembre a febrero, esta última asociada a los sistemas de baja presión con corrientes de aire frío arrastradas desde el norte, que a su vez provocan los frentes fríos en la ciudad.

En una escala menor se ve influenciado por las serranías, orientadas S-SE y N-NE formando valles, y su cercanía con el golfo de california provocan cambios en los flujos de aire afectando los patrones de flujo; entre el día y la noche.

La alta radiación provoca que el suelo se caliente y a su vez el aire cercano, durante la noche el calor se desprende y el suelo se enfría. Sobre esta capa se forma una capa de aire más cálido y denso, impidiendo la circulación de aire vertical, a su vez el sistema topográfico impide la circulación de aire horizontal, provocando el efecto de inversión térmica en los meses invernales.

Un estudio de la ciudad de Hermosillo plantea que, partiendo de la expansión de las ciudades, densidad poblacional y el tránsito vehicular, se ocasiona un impacto climático y ambiental, como el fenómeno de Isla de Calor Urbana (ICU), definida como una cúpula sobre la ciudad con aire más caliente que a su alrededor, la cual genera una sensación térmica mayor en los espacios exteriores. Habitando en el desierto Sonora- Arizona y con clima cálido-seco, la investigación considera importante demostrar la existencia de la ICU y morfología en la mancha urbana, por medio de mediciones durante el período cálido en transectos en los principales ejes viales de la estructura urbana. Obtener temperaturas superficiales, analizar la ICU y factores que intervienen en su formación, la información permitiría generar estrategias de mitigación de este fenómeno, lo que favorecerá la sustentabilidad de la ciudad (Mercado y Marincic, 2017).

Otro estudio de la ciudad de Hermosillo plantea que el evidente incremento de temperaturas en los años recientes posiciona a esta región como altamente vulnerable, centrando la investigación en el análisis de la variabilidad diaria y estacional de temperaturas y lluvias en la ciudad y en sus alrededores, haciendo énfasis en el gradiente térmico hacia el mar. Los datos parten de una red de 21 pluviómetros y 13 sensores de temperatura instalados dentro y fuera de la zona urbana. Adicionalmente también analizan datos de calidad del aire (tanto PST como partículas de polen y esporas). Los datos también muestran la existencia de la isla de calor urbana, la gran variabilidad de las lluvias de verano y la homogeneidad de las lluvias de invierno que ocasionan diferencias marcadas en la calidad del aire. Se pretende su disponibilidad para la población y a los tomadores de decisiones del municipio de Hermosillo, esperando sean útiles para evaluar, prevenir y mitigar los efectos adversos de potenciales eventos extremos en la población (Gutierrez-Ruacho, y otros, 2018).

3. Calidad el aire en las ciudades

Un estudio reciente en la ciudad de Hermosillo relaciona variables como la cobertura vegetal y la calidad del aire como componentes importantes de la calidad de vida y la ecología humana en

Hermosillo, Sonora, considerada altamente vulnerable al cambio climático. El objetivo de dicho trabajo fue correlacionar variables socioeconómicas como la densidad de población y la cobertura sin pavimentar con las partículas suspendidas totales (PST), oscilación de temperatura diaria (OTD) y cobertura vegetal (CV) para establecer zonas prioritarias de reforestación para el gobierno de la ciudad. Estimaron PST y OTD para cada AGEB por interpolación espacial utilizando los “splines” con barreras de 3 y 7 estaciones de muestreo, respectivamente. Obtuvieron densidad de población para cada AGEB del Censo de Población y Vivienda 2010 del INEGI y porcentaje de cobertura sin pavimentar para cada AGEB de registros del gobierno municipal. Mapearon CV (cobertura vegetal) analizando ortofotos aéreas digitales utilizando GIS y digitalización manual. Estimaron CV a nivel AGEB por muestreo. El porcentaje promedio de CV para Hermosillo es 6.4%. También se encontró que la CV está asociado negativamente con PST y OTD, destacando la importancia de aumentar la cobertura verde para mejorar la calidad de vida urbana en tierras áridas y la elaboración de un mapa de priorización de zonas de reforestación para Hermosillo (Ortega-Rosas, et al., 2020).

En el Programa de gestión para mejorar la calidad del aire del estado de Sonora (PEMCA) 2017-2026 definen a los PM10 como partículas menores a 10 micrómetros, y a variables como la industria, movilización de bienes y servicios, el uso de suelo y sus actividades, además de características climáticas como causantes de una mala calidad del aire (Tabla 1). A su vez se relaciona con problemas a la salud, afectaciones a los ecosistemas y daño a materiales expuestos, por lo que el programa presenta el monitoreo, seguimiento, retos, metas y acciones para mejorar la calidad del aire.

Tabla 1 Especificaciones técnicas de la Norma Oficial Mexicana Vigente para PM₁₀

NOM	Contaminante	Concentración	Minimo Permisible	Criterio anual
NOM-025-SSA1-2014	PM ₁₀	24 horas	75 µg/m ³	Por lo menos tres trimestres con al menos 75% de los promedios de 24 h validas
		Anual	40 µg/m ³	
	PM _{2.5}	24 horas	45 µg/m ³	
		Anual	12 µg/m ³	
NOM.025-SSA1-2021	PM ₁₀	24 horas	70 – 60 - 50 µg/m ³	Cumplimiento gradual de los valores límites para

		Anual	36 – 28 – 20 µg/m3	concentraciones ambientales por años. 1 ^a – 3 ^a – 5 ^a
	PM _{2.5}	24 horas	41 – 33 – 25 µg/m3	
		Anual	10 – 10 – 10 µg/m3	

Fuente: NOM-025-SSA1-2014/ NOM-025-SSA1-2021

El reporte también observa las emisiones desde su riesgo a la salud humana por exposición a partículas menores a 2.5 micrómetros (PM_{2.5}), partículas menores a 10 micrómetros (PM₁₀), ozono(O₃), Bióxido de azufre (SO₂) el bióxido de nitrógeno (NO₂) y el monóxido de carbono (CO), mismos que se encuentran normados en México.

Importante resaltar el estudio que destaca los problemas ambientales asociados a los problemas de salud de la ciudad de Hermosillo, Sonora, que con información del sistema de salud plantea que se atienden de manera desintegrada y poco efectiva. Solamente 15% de los planes para combatir el cambio climático que han enviado los países firmantes del Acuerdo de París del 2015, menciona a la salud como parte de los beneficios obtenidos de este esfuerzo. Este trabajo pretende contribuir a direccionar integralmente los riesgos ambientales a la salud para mejorar el bienestar de la población (Duarte-Tagles, et al., 2021).

4. Crecimiento Urbano e Impactos en el Ambiente

Vidal y Romero (2010) presentan el caso de la ciudad de Concepción en Chile, donde el proceso de urbanización sobre las cuencas modifica los componentes del ciclo hidrológico, en especial los volúmenes de agua que escurren o anegan la superficie de los suelos durante el periodo de lluvia. Finalmente observaron que a mayor extensión se incorporaban nuevas áreas afectadas a riesgo de inundación fluvial y anegamientos, que pueden ser directamente relacionados con la urbanización. (Vidal & Romero, 2010).

En el trabajo de Chavira y Ríos se expone la influencia de las vías de comunicación en la expansión de las ciudades, por medio de Sistemas de Información Geográfica para evaluar la influencia de la construcción de carreteras y el desarrollo urbano, recolectaron de diversas investigaciones

los distintos métodos usados para describir los patrones espacio-temporales de la estructura del uso del suelo e identificaron las variables más utilizadas, resultando la red vial, uso de suelo, población, área urbana entre las más consideradas para los estudios (Chavira-Quiñonez & Rios-Quezada, 2018).

En el modelo de estudio de Zhao 2017 da como resultado que la expansión urbana se acelera en un inicio al aumentar la densidad en la red vial, luego disminuye después de que se alcanza un punto de inflexión; y al exceder el umbral, las áreas urbanas dejan de expandirse (Zhao, et al, 2017).

Por otro lado, en el análisis de Frick, 2018 de la relación entre las temperaturas superficiales y el tejido urbano toma en cuenta las variables de cobertura vegetal, reflectividad superficial y la distribución de material particulado para la ciudad de Temuco-Padre las Casas, Chile utilizando imágenes Landsat, SIG y registros de emisiones. Se mencionan en la investigación diferentes ciudades que cuantifican las diferencias en las islas de calor entre la zona urbana y rural entre los 3°C hasta los 7°C de diferencia entre las zonas (Frick Raggi, 2018).

En el año 2012 la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), actualmente Secretaría del Bienestar, publicó “La expansión de las ciudades 1980 – 2010”, material cartográfico y estadístico que describe la situación de 135 ciudades de México que cuenta con más de 50 mil habitantes, con el objetivo de tener una visión más amplia para estudios y toma de decisiones en temas de desarrollo urbano. Se resalta la necesidad de evitar la expansión desordenada de las ciudades en áreas no aptas, promover una construcción sustentable, fortalecer la movilidad sustentable, el manejo eficiente de recursos naturales, y crear entornos seguros y habitables. También se enfatiza la importancia de proteger zonas agrícolas, forestales y de servicios ambientales. La Ciudad de Hermosillo del 2016 al 2022 creció 2.41 veces su población y 5.27 su territorio (Figura 2), con una densidad de población de 40.64 hab/ha. En conclusión, se espera que la información cartográfica y estadística funcione para adaptarlo a un modelo de crecimiento de ciudad sustentable, densa, compacta, conectada, equitativa, accesible e integral (SEDESOL, 2012).

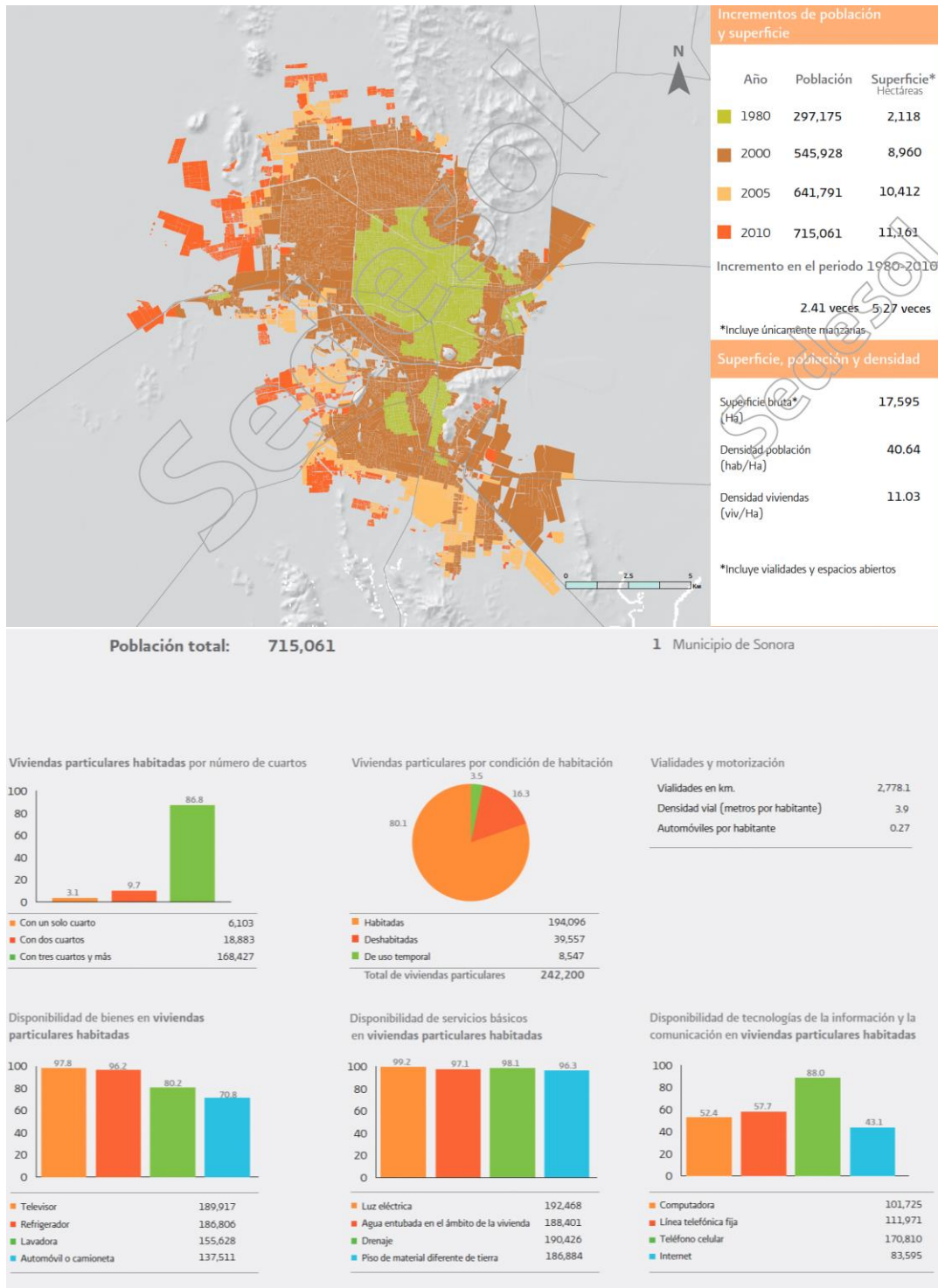


Figura 2 Crecimiento de la ciudad de Hermosillo. Mapa del crecimiento de Hermosillo (Superior), Graficas de población y vivienda (inferior). Fuente: Expansión de las ciudades 1980-2010, SEDESOL, 2012.

5. Vegetación Urbana y Servicios Ambientales

La vegetación es la esencia de las áreas verdes a la que el ser humano da su cultura y carácter. Dentro del área urbana, la vegetación arbórea es la que otorga los mayores servicios ambientales que están científicamente relacionados con la calidad de vida de la población en las ciudades, así lo plantean Meza y Moncada (2006) en su artículo donde analizan las áreas verdes de la Ciudad de México, misma que recopilamos para delimitar el parámetro de *cobertura vegetal* de que se plantea con las siguientes bases del estudio.

- Argumentos y análisis histórico que dan sustento a la importancia del conocimiento del territorio para planear ciudades sanas y resilientes.
- Describe los beneficios de las áreas verdes a la calidad de vida.
 - En lo ambiental, los espacios verdes contribuyen a regular el clima urbano, absorben los contaminantes, amortiguan el ruido, permiten la captación de agua de lluvia para la recarga de los mantos acuíferos, generan equilibrios ambientales en suelo, agua y aire, fundamentales para los entornos urbanos.
 - En la dimensión social se considera como uno de las más relevantes para la ciudad. Como equipamiento social, las áreas verdes son un soporte en el esparcimiento y la recreación, además de ser el centro de convivencia por excelencia.
 - En lo psicológico, la presencia de vegetación, particularmente arbórea, es factor de alta calidad de vida, en ciudades con un ritmo de vida acelerado permite que el sistema sensorial se relaje.
 - Adaptabilidad a usos diversos a través del tiempo.
- Normas, leyes o reglamentos relacionadas con las áreas verdes.
 - Organización Mundial de la Salud (OMS) estableció la recomendación de que en toda zona urbana debería existir, al menos, una superficie de nueve metros cuadrados de áreas verdes por habitante.
 - Otros organismos destacan la importancia de que éstas se encuentren a una distancia no mayor a quince minutos a pie de los hogares.
 - Plan Regional de Nueva York postuló once metros cuadrados de espacios verdes por persona.

- London County Plan calculaba dieciséis metros cuadrados, y el Plan de Extensión de París, una superficie de 17 metros cuadrados por habitante.
- Identificación de problemas relacionados con la planeación y las áreas verdes.
 - la composición vegetal y la distribución espacial de dichas áreas son desiguales.
 - conflictos políticos impiden invertir recursos para ampliar y profundizar en el conocimiento de esta región.
 - Modelo de crecimiento neoclásico racional caracterizado por lo ordenado, lo recto, lo simétrico, lo parco, lo uniforme, lo limpio, lo bien hecho y lo funcional, tomando a la circulación como principal factor de diseño.
 - Aumento de la población, expansión de la mancha urbana, desplazamiento y crecimiento de zonas agrícolas y el modelo de crecimiento provocan la fragmentación de las áreas verdes.
 - Los árboles en las ciudades están expuestos a condiciones adversas y agentes oxidantes (ozono, bióxido de azufre, fluoruros y partículas del aire) que disminuyen su vigor y mueren más rápido que en ambientes naturales.
 - Lista de factores a considerar que propician el daño al arbolado urbano (Meza Aguilar y Moncada Maya, 2006).

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Cerca del 70% de la población en el mundo habita en ciudades, el 60% del PIB viene de las actividades y cadenas de consumo que giran en torno a ellas, la densidad trae consigo desarrollo productivo, comercial, cultural, científico y social por mencionar algunas de las formas que toman como parte del metabolismo urbano, ocupan el 3% del territorio en el mundo, producen el 75% de las emisiones de carbono y consume entre el 60 y 80% de la energía que se produce a nivel mundial (ONU, 2021).

En el 2016 se dio a conocer que el 90% de los habitantes de las ciudades respiraban aire que no cumplía con las normas de seguridad que establece la Organización Mundial de la Salud, identificando a las partículas suspendidas en el ambiente menores a 10 μm de diámetro (PM10) como riesgosas para la salud, ese mismo año provocó un estimado de 4.2 millones de muertes asociadas a la calidad del aire (ONU, 2021). Aunado a lo anterior, si sumamos el efecto de los virus en el ambiente que pueden provocar una pandemia mundial (COVID-19) y afectar en primera instancia el sistema respiratorio, podemos decir que, de continuar con las actuales prácticas, los habitantes de las ciudades corren el riesgo de acelerar el deterioro del sistema respiratorio y mermar su capacidad de hacerle frente a esta clase de virus.

En México existen 401 ciudades donde habitan el 74.2% de la población según el sistema urbano nacional, 14 ciudades tienen más de 1 millón de habitantes (SEDATU, 2018), y en el último censo 2020 de INEGI el municipio de Hermosillo, Sonora con 936 mil habitantes llega al umbral del millón.

Actualmente el modelo de crecimiento urbano y el uso del suelo se planifica a partir del análisis de la suma del medio físico natural y el medio físico transformado, incorporando un diagnóstico socioeconómico. Cada elemento natural o construido intervienen en el comportamiento de las variables climáticas en diferentes escalas, y el modelo de crecimiento actual no contempla la calidad del aire como factor a considerar, pese al impacto que provoca en la salud.

La posibilidad de estudiar a la mancha urbana como un ecosistema más, con sus interacciones, movimientos internos, metabolismo y expansión; el Ecosistema Urbano (Larraga, 2015), considera una dimensión más adecuada para ver el panorama completo de la ciudad y la calidad de

vida de sus habitantes, ya que la falta de certeza en el impacto ambiental al interior de la mancha urbana, al modificar la morfología o incluso una nueva construcción no nos da la certeza que mejore la vida de la población.

Por todo lo anterior, resulta necesario ubicar la necesidad de intervenciones puntuales a partir de variables atmosféricas al interior de la ciudad, con el objetivo de reducir los impactos negativos al ambiente. Son necesarias herramientas para la toma de decisiones en cuanto a la planificación urbana y mitigar la contaminación del aire. Existe la capacidad de complementar el monitoreo ambiental con las 4 estaciones existentes en Hermosillo y las variables de oscilación de temperatura, y partículas suspendidas de $10\mu\text{m}$ de diámetro (PM_{10}) en relación con la expansión de la mancha urbana y la reducción de la cobertura vegetal de los últimos 5 años, temas centrales que se abordan en esta investigación.

JUSTIFICACIÓN

La investigación suma esfuerzos como herramienta de análisis de la presión sobre el ecosistema urbano y resiliencia para la gestión sostenible de los recursos y planificación de la ciudad apoyando el objetivo 11.3 de los ODS, que consiste en aumentar la urbanización inclusiva y sostenible y la capacidad para la planificación y la gestión participativa, integradas y sostenibles de los asentamientos humanos. La meta es evaluada por dos indicadores; 1) Relación entre la tasa de consumo de tierras y la tasa de crecimiento de la población y 2) Proporción de ciudades que cuentan con estructura de participación directa de la sociedad civil en la planificación y gestión urbana y si funcionan con regularidad y democráticamente (ONU, 2018)

En 2017 se integra el tema de Cambio climático en la Guía Metodología para la Elaboración y Actualización de Programas municipales de desarrollo, integra el estudio de emisiones GEI y partículas suspendidas a la planeación de las ciudades (Marambio-Castillo, et al., 2017). La ciudad de Hermosillo aún no actualiza sus programas de desarrollo urbano con los nuevos criterios de análisis que integran la guía.

La ciudad de Hermosillo cuenta con datos históricos del último lustro del monitoreo de temperatura y partículas suspendidas, así mismo la evidencia cartográfica, las imágenes satelitales de alta resolución y los registros de organismos públicos ubican en un espacio-temporal las acciones urbanas. Su importancia radica en conocer el efecto de estas acciones a los parámetros ambientales.

En este sentido se busca crear una herramienta para la toma de decisiones y para tener un panorama ambiental integrado que apoye a identificar las acciones urbanas, dónde y cuándo se han realizado y sus repercusiones en el ambiente. Además, decidir y gestionar el desarrollo urbano de una manera eficiente práctica y con bases científicas.

De antemano se conoce de la relación entre las variables climáticas, y la vegetación en los entornos naturales, de las cuales se ha comprobado su repercusión en el cambio climático. También se ha demostrado la relación entre las partículas suspendidas en el ambiente y las enfermedades del sistema respiratorio (Duarte-Tagles ,2021). Con esta relación y la identificación de las intervenciones urbanas, se podrá formular como antecedente, dependiendo de la consistencia de los resultados se pueden sentar las bases para aplicarse en otras ciudades.

HIPÓTESIS

Existe una relación tanto en el crecimiento de las ciudades, como en la variación de la cobertura vegetal que inciden en el aumento de los parámetros de temperatura y cantidad de partículas suspendidas en el ambiente.

OBJETIVOS

Objetivo General

Evaluar el impacto del crecimiento de la ciudad de Hermosillo en el ambiente urbano a partir del análisis de temperatura, partículas suspendidas PM10, expansión de la mancha urbana y cobertura vegetal de los últimos 5 años para su uso en la toma de decisiones para la gestión del desarrollo urbano en la ciudad.

Objetivos Específicos

- Identificar las zonas de mayor crecimiento, expansión poblacional de la ciudad, y la cobertura vegetal mediante uso de dron de los últimos 5 años.
- Analizar las variables de temperatura y concentración de las partículas suspendidas PM₁₀.
- Correlacionar las variables climáticas, cobertura vegetal y expansión urbana.
- Determinar el impacto en el ambiente del crecimiento urbano de la ciudad.

METODOLOGÍA

1. Descripción del Área de Estudio

Con un enfoque cuantitativo se abordan la caracterización y diseño metodológico de la investigación que tiene lugar en el centro de población de Hermosillo, Sonora, ubicada geográficamente a los 29°06' latitud Norte y 110°58'23" longitud oeste a una altitud de 210 msnm (Figura 3).

El Sistema Urbano Nacional (SUN) (SEDATU, 2018) la clasifica como ciudad tipo 1, zona metropolitana, aprovechan su ubicación estratégica y conexión con el corredor CANAMEX para potenciar su vocación como nodo de servicios regional, alberga plataformas logísticas y es destino de servicios regionales que dinamizan y aumentan el movimiento dentro y periferia de la ciudad.

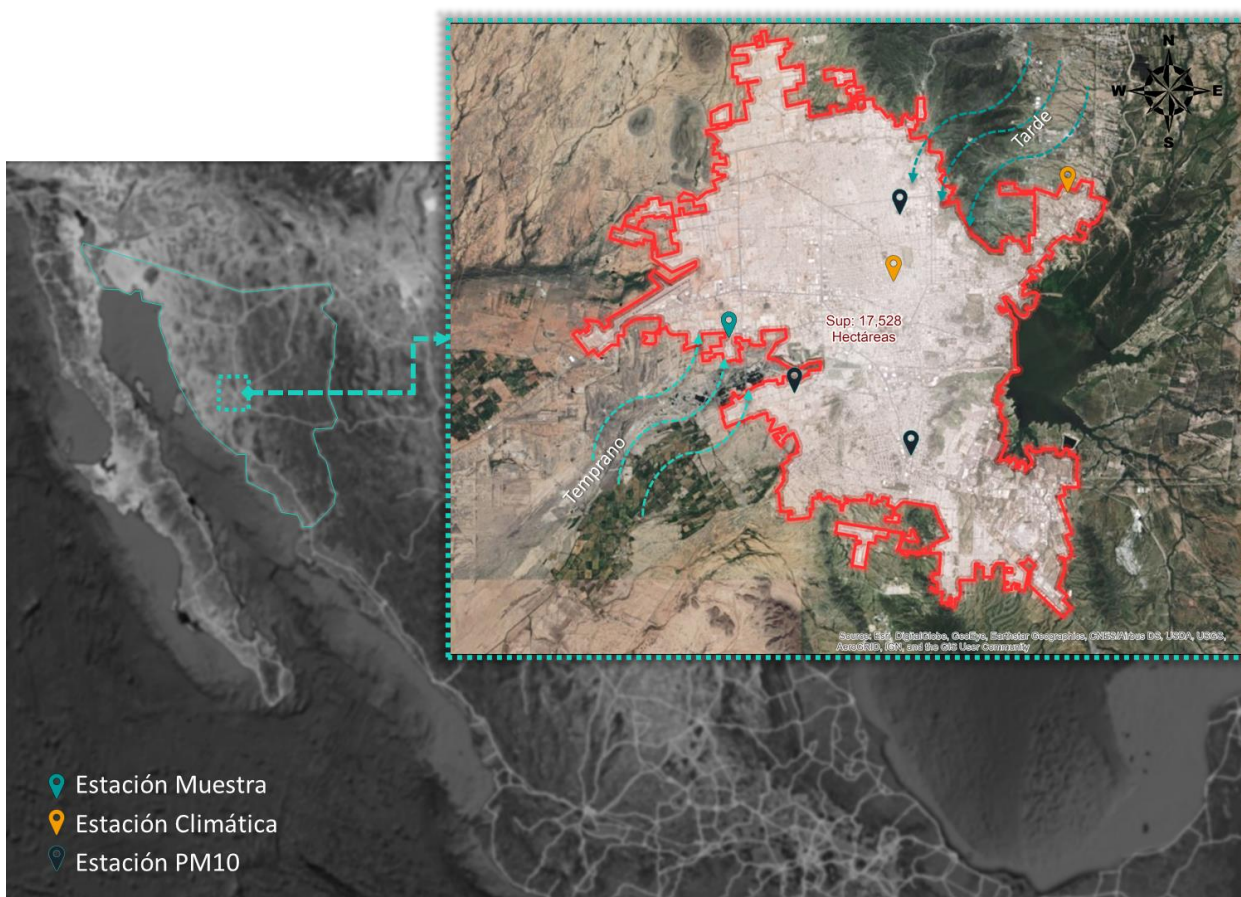


Figura 3 Ubicación del área urbana de Hermosillo, Sonora.

Fuente: Elaboración propia edición a partir de imágenes satelitales.

El primer límite del área de estudio se establece por el Programa de Desarrollo Urbano de Centro de Población de Hermosillo 2014 con una extensión de 209 mil hectáreas, con la intención de marcar una diferencia entre la mancha urbana más densa de la ciudad y la serie de ejidos y campestres que se conectan a ella. Un segundo límite que se toma es el área de la mancha urbana a Julio 2022, extraída de las imágenes satelitales en la plataforma de Google Earth.

La población municipal es de 936,263 habitantes con cifras de INEGI al 2020, donde 858,929, el 76% de la población habita dentro límites de la mancha urbana, donde la densidad al centro va desde 0.1 a 150 habitantes por hectárea, y en los extremos Norte, Norponiente, Sur, Surponiente llegan a alcanzar promedios de más de 400 hab/ha (Figura 4).

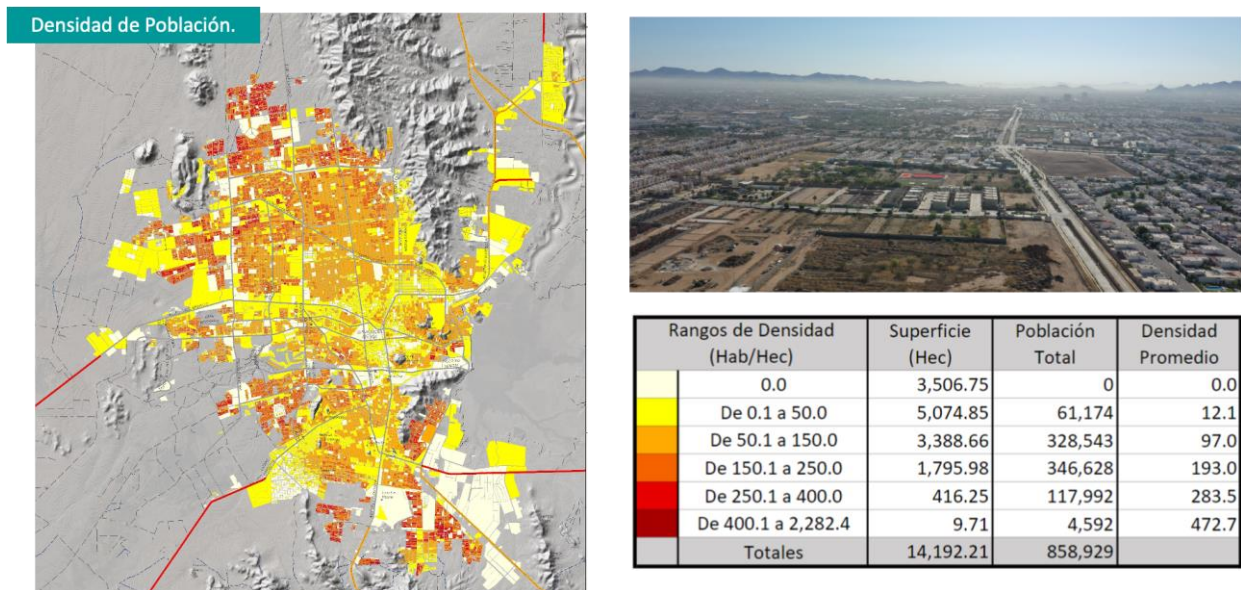


Figura 4 Densidad de población de Hermosillo, Sonora.

Fuente: INEGI, datos del Censo de población (2020), imágenes a partir de levantamiento de dron.

1.1 Clima

Con información de la estación 26139 Hermosillo II el clima dentro del área urbana aplicando la metodología de clasificación climática de Wladimir Köppen modificada por Enriqueta García, el cual se identifica como $BS_0(h')hw(x')(e')$ *clima árido, con un régimen de lluvias en verano con*

precipitación invernal mayor a 10.2% sin presentar canícula, y una oscilación térmica anual muy extrema, con el mes más caliente después del solsticio de verano.

El PDUCP con información de CNA caracteriza a los vientos dominantes provenientes del suroeste con rumbo noreste por la mañana y en sentido contrario por la tarde, presentándose en julio, agosto y septiembre las más altas velocidades, radiación solar promedio de **6 kWh/m²**.

1.2 Calidad del aire

Hermosillo cuenta con registros de calidad del aire gracias al *Programa de evaluación y Mejoramiento de la Calidad del Aire (PEMCA)*, desde el 2000 identifica las principales fuentes de emisión para PM₁₀ que son representativamente la labranza agrícola (21%), caminos no pavimentados (18%), incendios forestales (13%) según sus reportes.

Los resultados de las muestras del inventario de emisiones de contaminantes criterio para el aire desagregado por tipo de fuentes, categoría y tipo de contaminante para material particulado PM₁₀ y PM_{2.5}; se encontró la presencia de Ozono (O₃) bióxido de azufre (SO₂) dióxido de nitrógeno (NO₂) y monóxido de carbono (CO).

1.3 Crecimiento Urbano

En la actualización del Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población de Hermosillo 2014 se incrementó el límite de crecimiento de la primera (33.540 ha) y segunda etapa (39,100 ha) debido a la expansión hacia el norte y sur.

1.4 Vegetación.

La carta de uso de suelo y vegetación caracteriza al área de estudio con el uso de suelo de “Área Urbana”, presenta una vegetación típica de zonas áridas desérticas, identificada en INEGI como “*Matorrales del desierto de sonora*”, con mayor densidad en las áreas de cerros y escurrimientos en la periferia, donde destacan matorrales de diferentes especies, mezquites, palo verde y palo fierro.

Dentro del área urbana se han identificado por medio de muestras que el 29.16% corresponde a especies nativas, se estimó que el uso promedio de plantas exóticas o especies introducidas es de

66.8% (ICr 95%: 53.6-80.0%), por su parte, la relación de cobertura vegetal-superficie fue de 32.34% m² /m² (Martinez Salido, 2017)

Como vegetación nativa en la ciudad se encuentra árboles y arbustos nativos de los cuales dominan el mezquite (*Prosopis spp.*), Palma de abanico (*Washingtonia robusta*), Tepehuaje (*Lysiloma sp.*), palo verde (*Parkinsonia florida* y *Parkinsonia microphylla*), Bagote (*Parkinsonia aculeata*), Guamúchil (*Pithecellobium dulce*), acacia (*Acacia spp*), Brea (*Parkinsonia praecox*), palo fierro (*Olneya tesota*), Torote (*Bursera spp.*), Uvalama (*Vitex mollis*), Ocotillo (*Fouquieria spp.*), palo blanco (*Ipomoea arborescens*), Amapa (*Tabebuia sp*), sahuaro (*Carnegia gigantea*), gobernadora (*Larrea tridentata*).

Las especies introducidas encontradas con mayor frecuencia son. Olivo negro (*Bucida buceras*), Naranja agrio (*Citrus aurantium*), Eucalipto (*Eucaliptus spp.*), Neem (*Azadirachta indica*), Benjamina (*Ficus benjamina*), Palma de dátil (*Phoenix dactylifera L.*), Pingüica (*Ehretia tinifolia*), Ceiba (*Ceiba pentandra*), Olivo (*Olea europaea L.*), Yucateco (*Ficus nítida*), Árbol de fuego (*Delonix regia*), Leucaena (*Leucaena sp.*), Pino salado (*Tamarix sp.*), Acacia (*Albizia lebeck*), Tronador (*Tecoma stans*), Tabachin (*Caesalpinia pulcherrima*), Ciprés común (*Cupressus sp*), Moringa (*Moringa oleífera*), Palma canarias (*Phoenix canariensis*), Árbol botella (*Brachichyton populneus*), Almendrón (*Terminalia catapa*), Grevilia (*Mangifera indica*), Mango (*Casuarina spp.*), entre otras (Martinez Salido, 2017).

2. Métodos y Técnicas De Recolección De Datos

En la Figura 5 podemos observar el diagrama general con las variables y parámetros que serán analizados en esta investigación, el proceso metodológico a desarrollar se detalla en los siguientes subapartados.



Figura 5 Diagrama General de análisis de correlación de los parámetros.

Fuente: elaboración propia.

2.1. Clima: Estaciones meteorológicas

Los datos climáticos se obtuvieron a partir de la observación por medio de monitoreo, registros históricos y análisis de un periodo de 5 años a partir de las estaciones de monitoreo disponibles dentro de los límites del área urbana. (Tabla 2).

Tabla 2 Ubicación de estaciones de monitoreo climático.

Estación	Coordenadas		Parámetro de monitoreo	Unidad de Medida
	Lat.	Long.		
<i>Hermosillo II: 26136 (Conagua) Aeropuerto</i>	29.077 29.088	-110.932 -111.061	Temperatura. Humedad	°Celsius % de saturación
<i>AIRLINK Poniente (Davis WL)</i>	29.078	-111.029	PM10, PM2.5, PM1	µg/m ³
<i>AIRLINK Norponiente (Davis WL)</i>	29.120	-111.049	Temperatura Humedad	°Celsius % de saturación
<i>WS-2000 Poniente</i>	29.078	-111.029	Humedad Temperatura	% de saturación ° Celsius
<i>WS-2000 Norponiente</i>	29.120	-111.049	Viento (velocidad. y dirección.) Radiación.	Km/hr y Orientación w/m ²

Fuente: Elaboración propia a partir de fichas técnicas de los dispositivos.

Adicionalmente se integran al estudio 2 estaciones de monitoreo, una al poniente y otra el norponiente, dentro de los límites del área de expansión urbana mismas que registraron datos desde 2021, y durante más de 1 año.

Las estaciones de muestreo climático instaladas son del modelo WS-2000 de la marca *ambient weather* puede efectuar el monitoreo remoto exterior de la velocidad del viento y dirección, lluvia, temperatura, humedad, radiación ultravioleta y solar, así como presión barométrica. El instrumento incluye un sensor para interiores que monitorea temperatura y humedad, se conecta a una consola LCD TFT de alta definición para leer el tiempo real los parámetros (Figura 5).



Figura 6 Estación de monitoreo Ambient Weather WS – 2000.

La matriz de sensores inalámbricos se conecta a la consola a través de RF (915 MHz) hasta una línea de visión de 330 ft al aire libre. La fuente de la matriz de sensores se alimenta de un panel solar que carga el supercondensador, con un respaldo de batería. Los datos son almacenados en una tarjeta SD presente en la consola almacenando datos históricos (máximos y mínimos con sello de fecha y hora para análisis de datos avanzados en Excel) además se pueden transmitir vía wifi a la página dando de alta por medio de un usuario en ambientweather.com. (2021 Ambient, LLC, 2021)

Los parámetros que se toman de estas estaciones son: Temperatura (°Celsius), Humedad (porcentaje de saturación), Velocidad del viento (km/hr), dirección del viento (orientación) y radiación solar (w/m^2).

Los datos registrados en años anteriores como los datos generados por las estaciones climáticas de muestreo se integran al análisis, siguiendo el siguiente proceso:

- 1) **Instalación y muestreo** durante 1 año de las zonas de mayor expansión (ver Expansión urbana).

- 2) **Registros históricos:** consiste en la recolección de los datos de los últimos 5 años y los generados por la estación de muestra poniente durante 1 año. El formato que se manejan en las bases de datos es formato *.csv.
- 3) **Limpieza de datos:** se trata de identificar si hay datos suficientes, comprobar que las lecturas sean coherentes y preparar los datos para el proceso de análisis estadístico.
- 4) **Análisis estadístico:** se procesan los datos para obtener una interpretación numérica y grafica de la variable, con el objetivo de poder encontrar una relación con los otros parámetros.
- 5) **Preparación y análisis multivariado:** se preparan los datos que se van a correlacionar con apoyo de un procesador de datos R.

2.2. Calidad del aire.

Se utilizarán los datos provenientes de las estaciones disponibles del Programa de monitoreo de calidad del aire de Hermosillo (PEMCA) y las estaciones instaladas dentro de los límites del área de estudio.

El PEMCA utiliza para recolectar los datos un muestreador de alto volumen – Wedding 600 para partículas PM_{10} de los que se extraen los resultados a partir de las muestras de los filtros de cuarzo marca Whatman de 20.3*25.4 cm y balanza electrónica analítica Satorius Modelo A200S-***D1B (Figura 7).



Figura 7. Muestreador de alto volumen wedding 600.

Fuente: PEMCA

De manera general se consideran los parámetros máximos permisibles que señala la NOM-025-SSA1-2021¹ para PM10 en 24 h de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y para un año de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

En el caso de la estación de muestreo, la cual estará en operación recolectando datos durante 1 año, se utiliza un instrumento de la marca DAVIS la estación de monitoreo de partículas suspendidas AIR-LINK (Figura 8) que mide con precisión el material particulado de PM1, PM2.5 y PM10, además de temperatura y humedad, brinda gráficos y lecturas del Índice de Calidad del Aire (AQI) codificadas por colores. Se conecta a una plataforma en línea Weather-Link que almacena los datos para poder visualizarlos

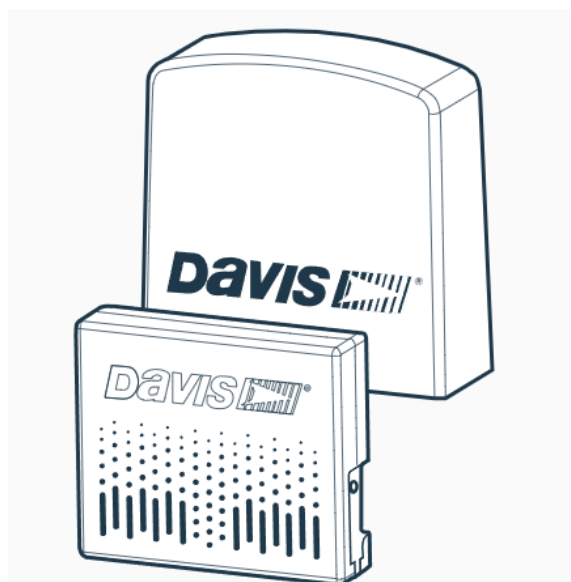


Figura 8 Estación Airlink, Davis

Fuente: Ailink Davis Datasheet

¹ DOF - 27/10/2021

en tiempo real y registro histórico en el celular o computadora por medio de su app o sitio web respectivamente (Davis Instruments, 2021).

Tabla 3. Ubicación de estaciones de muestreo de partículas suspendidas.

<i>Estación</i>	<i>Coordenadas</i>		<i>Equipo instalado</i>	<i>Unidad de Medida</i>
	<i>Lat.</i>	<i>Long.</i>		
<i>Noroeste (CBTIS 206)</i>	29.118	-111.007	PST y PM10	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
<i>Norte (UES)</i>	29.121	-110.942	PST y PM10	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
<i>Sur (COBACH)</i>	29.044	-110.959	PST y PM10	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
<i>Villa Bonita</i>	29.059	-111.015	PST y PM10	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
<i>AIRLINK Poniente (Davis WL)</i>	29.078	-111.029	PM10, PM2.5, PM1	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
<i>AIRLINK Norponiente (Davis WL)</i>	29.123	-111.056		

Fuente: PEMCA.

La ubicación de las estaciones climáticas se puede observar en la Figura 9. Los datos registrados en años anteriores como los datos generados por las estaciones climáticas de muestreo se integran al análisis, siguiendo el siguiente proceso.

- 1) **Instalación de estación Airlink.** durante 1 año de las zonas de mayor expansión (ver apartado Crecimiento urbano).
- 2) **Registros históricos:** consiste en la recolección de los datos de los últimos 5 años y los generados por la estación de muestra poniente durante 1 año. El formato que se manejan en las bases de datos es *.csv.
- 3) **Limpieza de datos:** se trata de identificar si hay datos suficientes, comprobar que las lecturas sean coherentes y preparar los datos para el proceso de análisis estadístico.
- 4) **Análisis estadístico:** se procesan los datos para obtener una interpretación numérica y grafica de la variable, con el objetivo de poder encontrar una relación con los otros parámetros.
- 5) **Preparación y análisis multivariado:** se preparan los datos que se van a correlacionar con apoyo de un procesador de datos R.

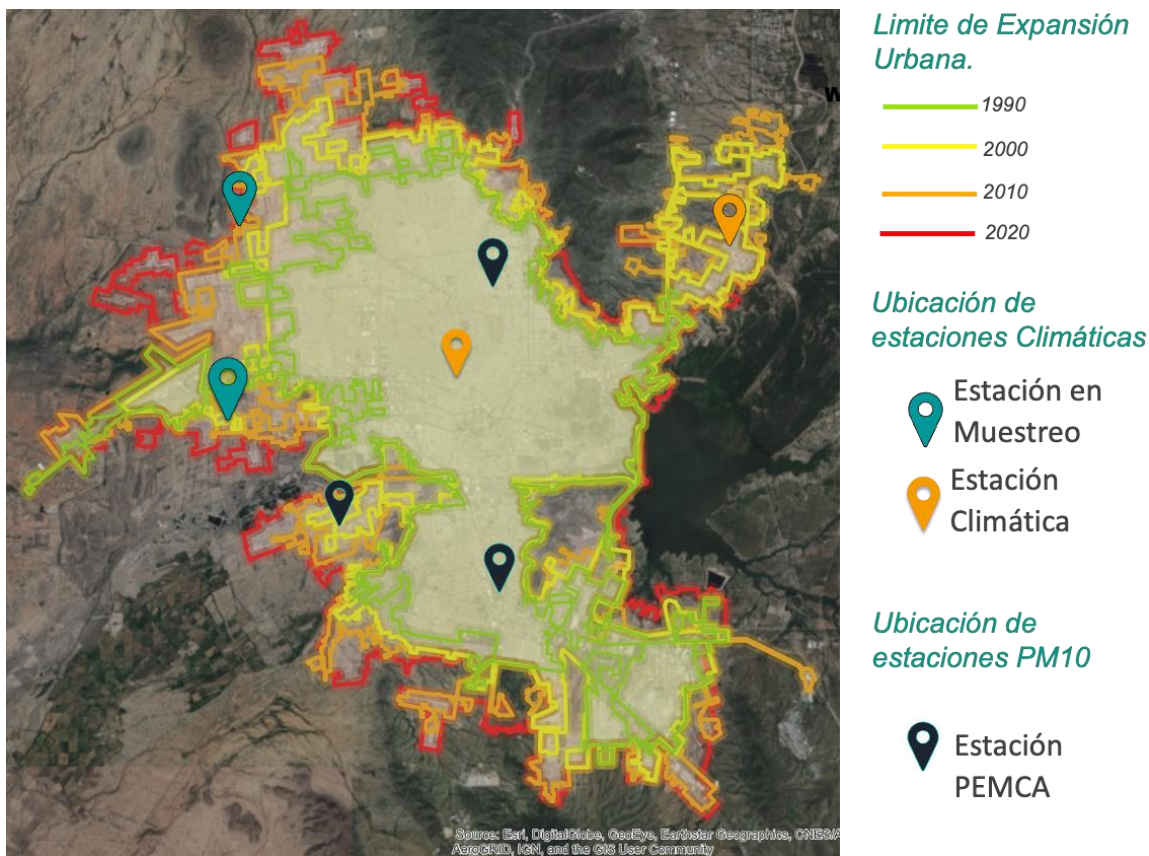


Figura 9. Ubicación de estaciones sobre los límites de crecimiento urbano 1990 – 2020. La línea verde representa los límites de 1990, línea amarilla el 2000, línea naranja 2010, y la línea roja el 2018. Fuente: elaboración propia a partir de imágenes satelitales.

2.3. Crecimiento urbano

La metodología para la definición de los límites de la expansión del área urbana se desarrolla en base a las necesidades de la investigación, ya que los parámetros analizados debían de guardar una serie de características registradas en otras investigaciones que los relacionan entre sí.

Se utilizó la técnica de fotointerpretación por medio de Google Earth con una base de trazo creada por la lotificación actualizada al año 2020, con el objetivo de basarse en el trazo para el mapeo y que pudiese ser replicada en otros años con el mínimo margen de error, y la regresión de imágenes temporales para extraer los polígonos anuales de expansión urbana, las cuales para definirla se utilizaron los siguientes criterios metodológicos.

- 1) En la regresión de imágenes de Google Earth se seleccionan de los años a analizar las imágenes del último mes o las imágenes disponibles más cercanas al final de año. Ejemplo, para el año 2016 se toma la imagen generada en diciembre que sería el final del año, lo mismo para 2017, 2018...etc.
- 2) La altura del ojo de mapeo ocurre a 1 km, para obtener un nivel de detalle más fino.
- 3) Se incorpora el área gris o área urbana, desarrollos y construcciones.
- 4) Si la urbanización o nuevos desarrollos dejaron dentro de la mancha lotes baldíos, cerros, lagos o banco de materiales se consideran dentro del área urbana y serán incorporados a la investigación en el año correspondiente.
- 5) En caso de que en los límites urbanos se encuentren áreas de desmonte, preparación de pie de casa, trazo de vialidad, o algún caso donde se haya retirado el terreno natural y este se encuentre impactado, se considera dentro del área de expansión urbana.
- 6) Las zonas agrícolas y áreas de cultivo que se encuentren en los límites de expansión, no se tomaran en cuenta y se dejaran fuera de la expansión de la ciudad.
- 7) En el caso de los asentamientos irregulares, ejidos semi-urbanizados, campestres o desarrollos rurales que se encuentren alcanzados por la mancha urbana requerirán un 60% de ocupación para incorporarlos al área de expansión.
- 8) En el específico caso de la ciudad de Hermosillo y para darle mayor peso a los datos que se generen hacia el interior de la ciudad, se dejara fuera del estudio al ejido la Victoria, tomando como límite al embudo conformado por los desarrollos de Café Combate y las Riveras.

2.4. Cobertura arbórea

Para delimitar la cobertura arbórea, con base en el trabajo de Meza y Moncada (2006), se integró a la metodología criterios de selección de áreas específicas cuyo principal factor de selección se basó en el servicio ambiental que prestan destacando los individuos arbóreos que se encuentran dentro de la mancha urbana, misma que determinara el área de expansión. Con el motivo de que se vea reflejada su influencia en el ambiente urbano y poder detectar la relación que guarda con el resto de los parámetros se tienen las siguientes consideraciones:

- 1) Se considera como principal factor de selección la función dentro del ambiente urbano, destacando el arbolado urbano.
- 2) Está relacionado con la delimitación temporal de la expansión de la ciudad.
- 3) La cifra de metros cuadrados por habitante no refleja la distribución, frecuencia o disponibilidad y accesibilidad para la población.
- 4) No importa el tipo de propiedad del suelo, si es pública o privada o su uso normativo o aparente.

La cobertura vegetal se cuantificará la *superficie servida por árboles plantados*.

La SEDATU cuenta con registro de áreas verdes y arbolado censado en el 2011 por medio de imágenes NDVI. Para la cuantificación de la superficie de cobertura vegetal actual para el año 2022 se hace uso de otras herramientas y procesos.

Para el análisis se utilizó un dron DJI Mavic Air2, con 3 baterías con una capacidad de vuelo de 30 min c/u. El procesamiento y clasificación de la Nube de Puntos Densa de las imágenes se realizó en el software de Agisoft Metashape y para el procesamiento y cuantificación de la vegetación se realizó en ArcGIS Pro (ver Anexo 0: Plan de Vuelo).

A partir de las limitantes urbanas para la toma de muestras de vegetación se definió el tamaño de la muestra; Hexágono de aproximadamente 31 hectáreas, donde el dron es capaz de muestrear 1 polígono con 2 baterías. A partir de aquí se siguió el siguiente proceso:

- 1) Definición de la muestra. Se genera una malla hexagonal (el hexágono maximiza los valores de la muestra en la malla) que incluye todos los límites de crecimiento. Las dimensiones de la muestra se calcularon en base a las capacidades de la aeronave Mavic 2 Pro (ver Anexo 0: Plan de Vuelo), se seleccionan las áreas de muestreo.
- 2) Plan de vuelo. Con las características manejadas en el plan de vuelo (ver Anexo 0: Plan de Vuelo) para Mavic 2 con control asistido por DJI GO 4 +Pix4D mapper. El vuelo generara un mosaico de imágenes de alta resolución.
- 3) Organización y separación del conjunto de fotos de cada muestra. Se preparan los archivos de la memoria extraíble para el armado del orto mosaico con el software de Agisoft, ya que cada foto cuenta con su dato de posicionamiento geográfico y ángulo de captura.

- 4) Nube de Puntos Densa (NPD). Se procede a crear en Agisoft, en el flujo de trabajo, la nube de puntos densa con “Calidad Alta”. Para lo que es importante contar con un equipo de cómputo adecuado para procesar las imágenes y disminuir el tiempo de proceso.
- 5) Clasificación de la nube de puntos densa (NPD). Una vez generada la NPD se clasifica con las herramientas de Agisoft, la que más nos interesa para este caso son las clasificaciones de la vegetación.
- 6) Importar a ArcGIS Pro. Se exporta la NPD de agisoft en un sistema de coordenadas WGS 84/UTM zone 12N por la ubicación del área de estudio. Se importa a ArcGIS Pro en un nuevo proyecto.
- 7) Procesamiento en ArcGIS. Para ver la información con la clasificación de la NPD se selecciona la visualización del modelo y simbología que se va a utilizar, seleccionando Elevación con una gradiente de color preestablecida (o seleccionada) y se selecciona por clasificación.
- 8) Purga de la clasificación NPD. Al visualizar el modelo, aparecerán todas las clasificaciones exportadas, por lo que requerimos seleccionar únicamente las que nos interesan: Vegetación media (Medium Vegetación) y alta (High Vegetación).
- 9) Generar Raster. Ya habiendo filtrado la clasificación de vegetación de la NPD se genera el Ráster de Cobertura vegetal. Para eso utilizamos herramientas de procesamiento “LAS Point Statistics As Raster” con el método “Most Frequent Class Code”.
- 10) Polígonos cuantificables. Una vez se obtiene el Ráster de cobertura vegetal, para poder cuantificar los m² se requiere convertir el ráster en polígonos, para lo que se utiliza el comando “Raster to Polygon”.
- 11) Limpieza y edición del polígono. Con los Hexágonos de las muestras ya geo posicionados en ArcGIS, la ortofoto de alta definición generada a partir de las imágenes en agisoft y los polígonos resultantes de cobertura vegetal se editan, cortan y limpian los errores del proceso y se definen los límites de la muestra.
- 12) Finalmente se obtiene el área en m² al exportar el resultado de la edición a Excel, para poder procesar los datos.

2.5. Definición de la muestra.

Para definir la muestra fue indispensable conocer trabajos anteriores como: La Correlación de la cobertura urbana vegetal con variables ambientales, donde se identifican zonas vulnerables de la ciudad, la caracterización de las islas de calor urbana y haber concluido con el análisis preliminar de expansión de la mancha urbana (Ver Figura 10 y 11, Anexo 0).

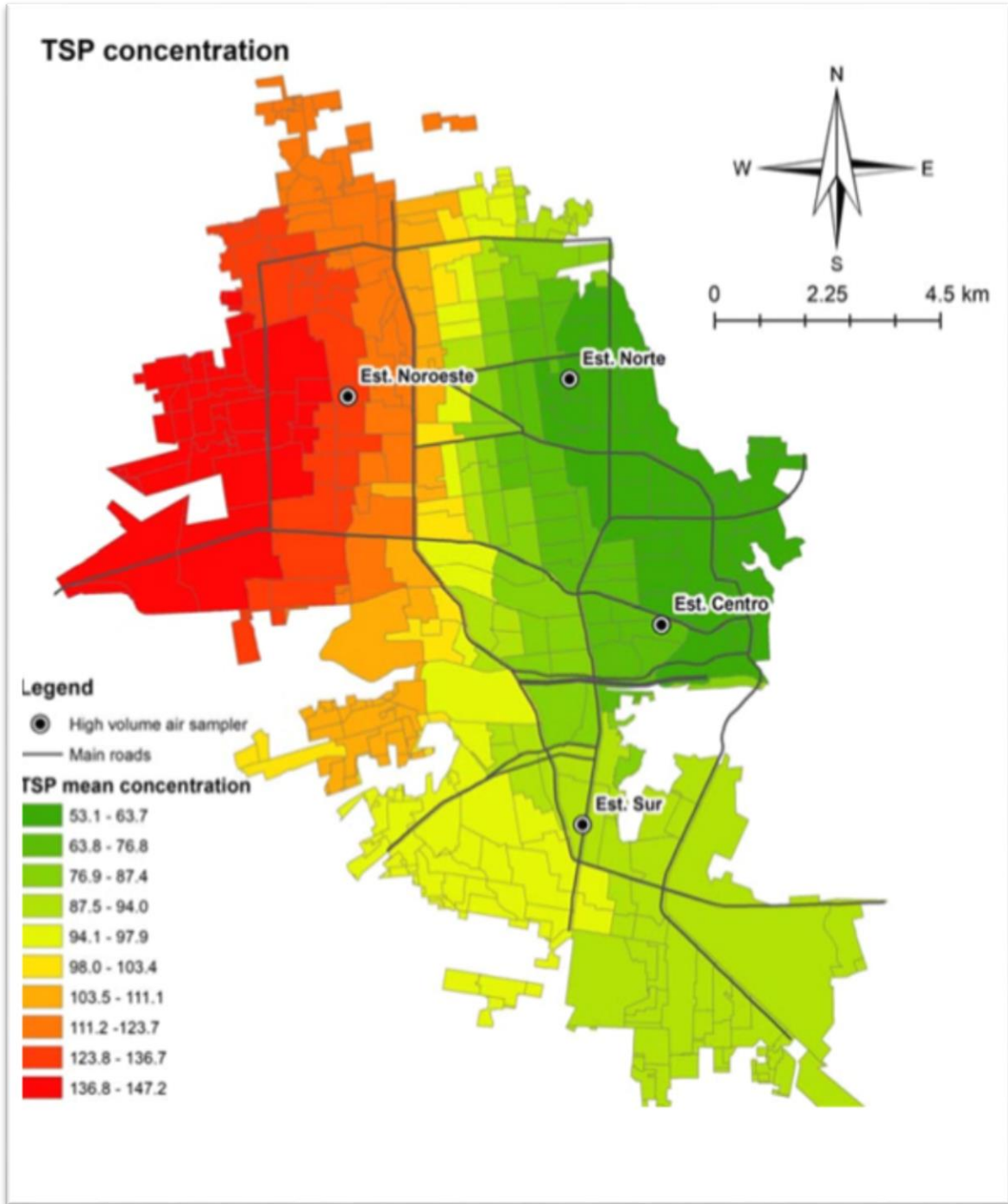


Figura 10 Concentración de Partículas Suspensas Totales (PST).

Fuente: Ortega-Rosas et al, 2020

Los estudios anteriores dejan claro que la zona más vulnerable en cuanto a exposición de partículas suspendidas en el ambiente, falta de vegetación y exposición a altas temperaturas es la zona poniente, seguida de la zona norte (Figura 10 y 11).

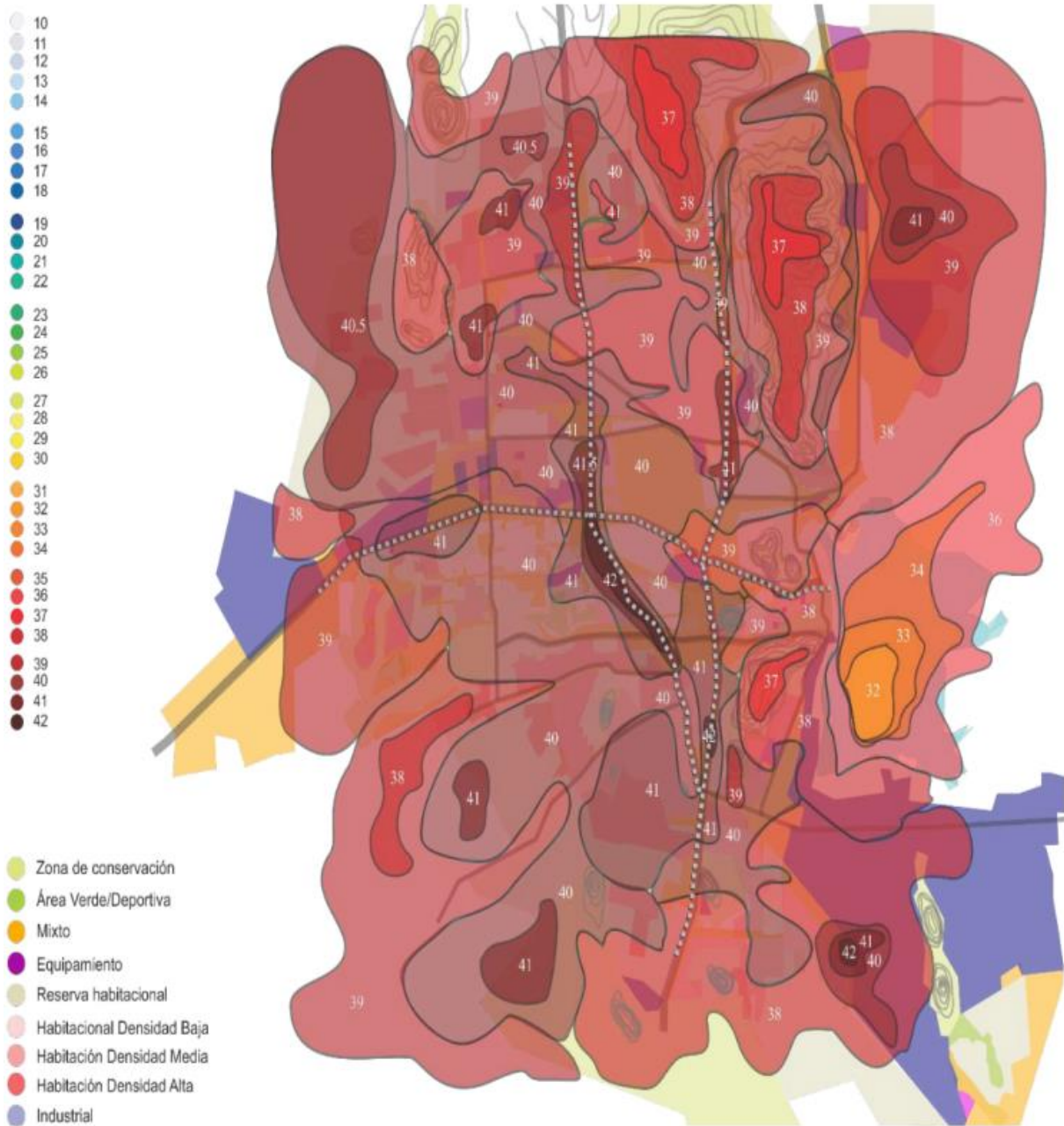


Figura 11 Isotermas de temperatura.

Fuente: Mercado y Marincic, 2017

Por lo anterior la investigación se concentra al poniente de la ciudad. Para facilitar el muestreo se dividió en una malla de polígonos hexagonales, las dimensiones se definieron a partir de cálculos de la capacidad de vuelo del modelo de dron y tiempo requerido para los vuelos, que cubre toda la zona (Figura 12).

Cada hexágono cubre un área de 311 mil 769.15 m², o 31.1 ha. Suman 130 hexágonos que cubren el poniente, de los cuales 10 se muestrearon con dron (Ver Anexo 0, Figura 40, 46 y 47).

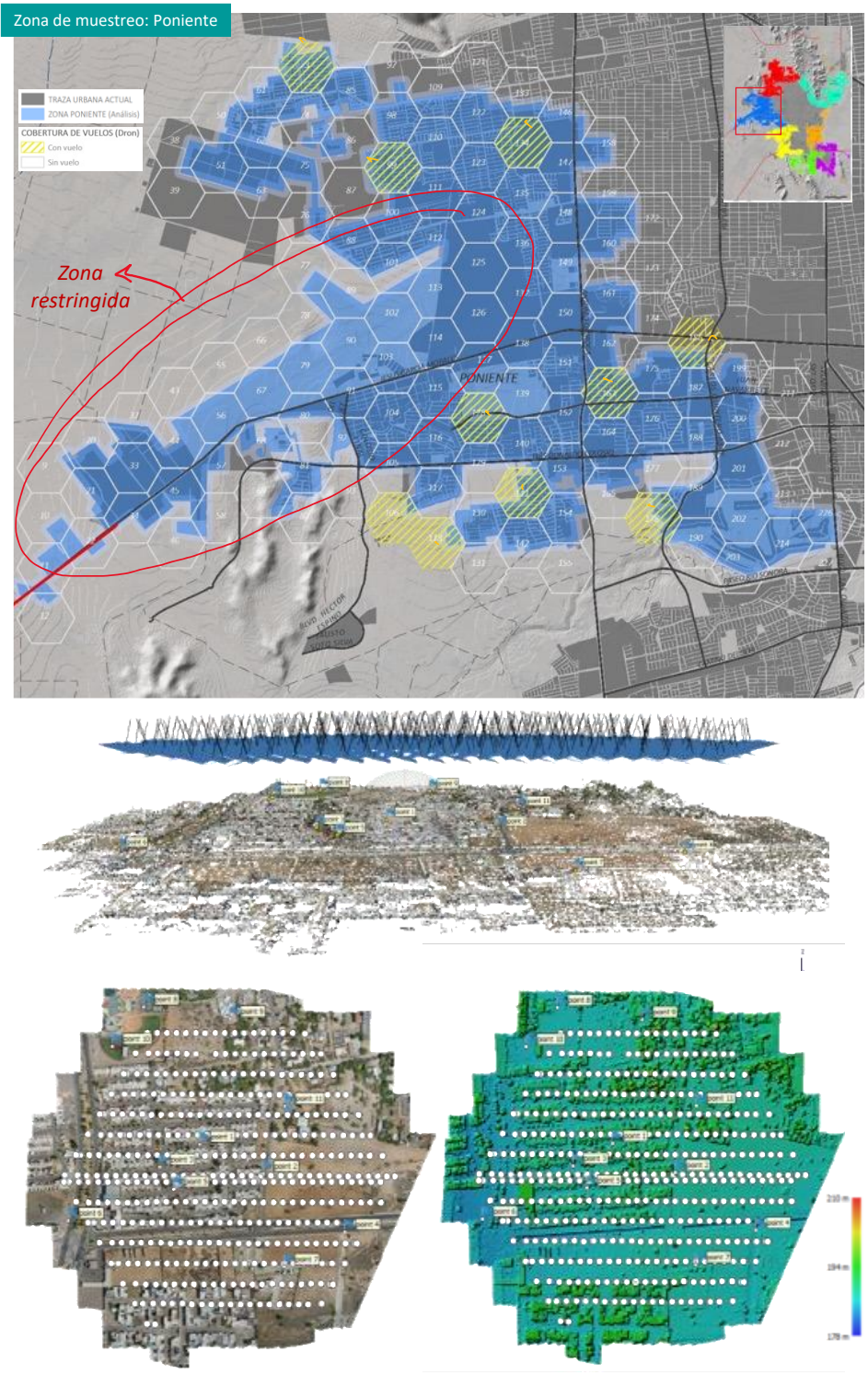


Figura 12. Unidades de muestreo (hexágonos) en la zona poniente de la ciudad. Mapa superior muestra la matriz ubicando las unidades muestreo, Imagen media, proceso con la nube de puntos densa, y abajo el resultado de altimetría de las muestras. Fuente: Elaboración propia mediante software dedicado y levantamiento de dron.

3. Plan De Tabulación Y Análisis De Datos

Para el análisis de los datos, las variables se analizaron cómo se presentan en el siguiente cuadro (Tabla 4).

Tabla 4 - Plan de tabulación y análisis de datos.

Objetivo	Hipótesis	Variable	Plan de análisis	Un.	Análisis	
General	Evaluar el impacto del crecimiento de la ciudad de Hermosillo en el ambiente urbano.	Existe una relación entre la expansión de la ciudad y el aumento en parámetros de temperatura y PM ₁₀	Dependiente			Estadística básica y análisis de regresión multivariable.
			1) Climática: tempera-	Datos de temperaturas máxima y mínima diarias, medias mensuales de los últimos 5 años, a partir de estaciones de monitoreo automáticas activas. Datos de la estación instalada al poniente, datos c/5 min durante 1 año.	°Celsius, mm, m/s	
			2) Calidad del Aire:	Datos máxima y mínima de la concentración de PM ₁₀ , medias mensuales de los últimos 5 años, a partir de estaciones de monitoreo activas del programa PEMCA Datos de estación instalada al poniente, datos c/5 minutos durante 1 año.	µg/m ³	
			Independiente			
3) Crecimiento urbano	Identificar área de crecimiento de la mancha urbana anual de los últimos 5 años.	Área: m ² , km ² , ha				
4) cobertura arbórea	Área de vegetación superior a 1.5 m ² anualmente durante de los últimos 5 años. Identificando las áreas en m ² .	Área: m ² , km ² , ha				

4. Metodología estadística.

Se utilizaron modelos de regresión lineal múltiple para estimar los efectos de las variables explicatorias cobertura de vegetación (*vegetación*) y cobertura urbana (*urbano*) sobre cada una de las respuestas concentración de partículas $<10 \mu\text{m}$ (PM_{10}) y temperatura media (T_{media}) a través de las unidades de muestreo. Se utilizó una prueba t de Wald (McCulloch et al. 2008) para determinar la existencia de efectos de las variables explicatorias en ambos modelos, esto es, probar las hipótesis nulas $H_0: \beta_i = 0$. Se aplicó una transformación logarítmica (\log_e) a PM_{10} para cumplir con el supuesto de linealidad y normalidad de los residuales. Se aplicó una transformación $\text{logit}(x) = 1/(1-x)$ para las variables *vegetación* y *urbano* para evitar la asociación entre media y varianza en las proporciones. En ambos modelos de regresión lineal múltiple, se incluyó un polinomio de segundo grado con longitud (*lon*, estandarizada por $\bar{x} = -111.035^\circ$ y $s = 0.016^\circ$) y latitud (*lat*, estandarizada por $\bar{x} = 29.092^\circ$ y $s = 0.017^\circ$) e interacciones con las variables explicatorias para considerar los efectos espaciales en las relaciones entre variables explicatorias y respuestas PM_{10} y T_{media} . También se incluyó el factor *MES* (niveles: *enero*, ... , *diciembre*) para considerar los efectos estacionales sobre PM_{10} y T_{media} . La estimación de los parámetros de los modelos de regresión, errores estándar y pruebas t de Wald se realizaron con el paquete *stats* del programa *R* (R Core Team 2023). El ajuste de los modelos de regresión lineal múltiple se realizó mediante un análisis de varianza comparando el modelo de regresión con el modelo de sólo intersección.

RESULTADOS.

1. Clima

La estación **26139 Hermosillo II** de CONAGUA cuenta con registros de 54 años (1966 – 2020), los cuales fueron utilizados para calcular el clima dentro del área, la aplicación de la metodología de clasificación climática de Köppen modificada por García (INEGI, 2005) mostraron los siguientes resultados (Figura 13):

La temperatura promedio resultante fue de 24.94°C, la oscilación térmica anual de 14.54°C, siendo julio el mes más caliente con un promedio de 31.91°C y diciembre el mes más frío con un promedio de 17.37°C. La precipitación anual de 363.50 mm, con lluvias de verano principalmente y lluvias invernales de 10.35%, siendo agosto el mes más húmedo acumulando en promedio de 54 años 93.1 mm y mayo el más seco con 3.05 mm.

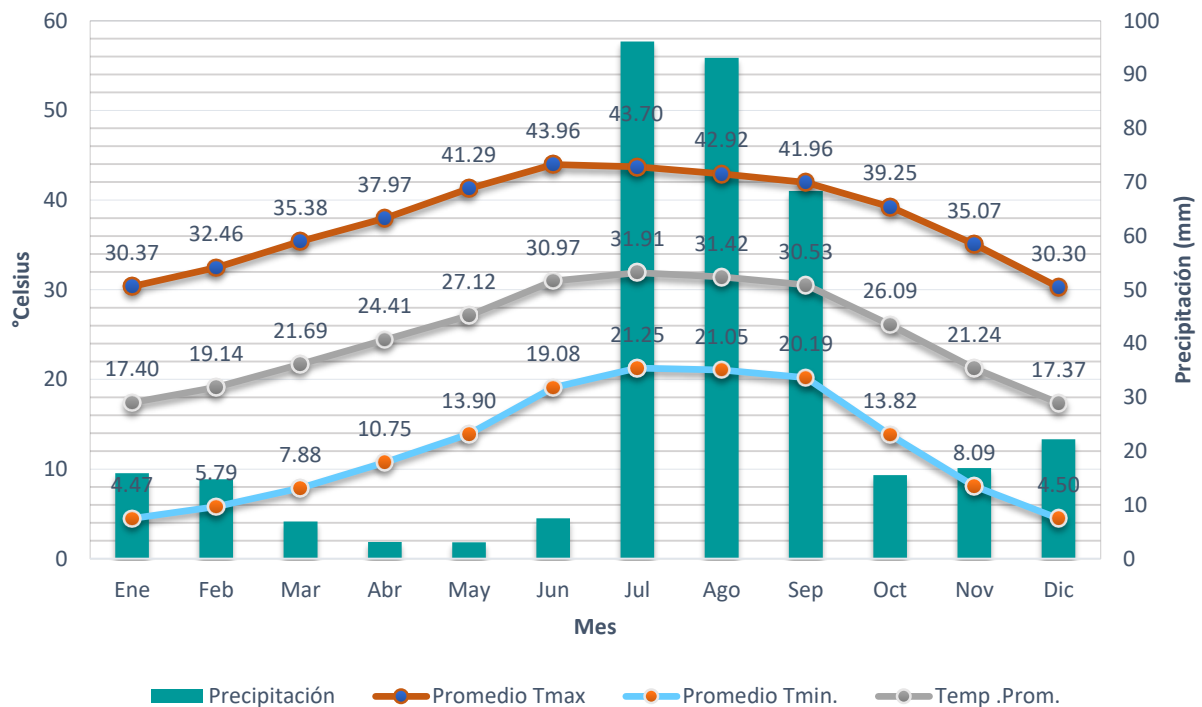


Figura 13. Temperaturas máximas y mínimas 1966–2020 (54 años) en Hermosillo. Las barras representan la precipitación en mm, la línea superior los valores máximos de temperatura en grados Celsius, la línea gris los promedios y la línea inferior los mínimos. Fuente: elaboración propia con datos provenientes de la estación 26139 Hermosillo II.

Se pueden identificar 3 periodos anuales en el comportamiento del clima: seco, húmedo y frío (Figura 13). El **periodo seco** sucede en los meses de marzo, abril, mayo y junio, es el periodo influenciado por los cambios en los movimientos convergentes de los vientos, que evitan retener la humedad, además se presenta el cambio de temperatura de bajas a altas. Después se presenta un **periodo húmedo** en julio, agosto, septiembre y octubre relacionado con el monzón mexicano, donde se presentan temperaturas cálidas y las lluvias más abundantes del año. El **periodo frío** se presenta en los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero, donde las lluvias son menos frecuentes y se presentan los frentes fríos.

Los resultados de las estaciones climáticas instaladas al **poniente y norponiente**, se presentan en los siguientes apartados: 1) Temperatura, 2) Lluvia y humedad, 3) Velocidad y dirección del viento y 4) Radiación solar.

1.1. Temperatura.

La estación **poniente** sobre la temperatura promedio mensual, la temperatura máxima y mínima mensual registrada en grados Celsius en un período de tiempo desde octubre de 2021 hasta diciembre de 2022. También se proporciona el promedio, máximas y mínimas de todos los meses en el período. Se registró una temperatura promedio de 24.78°C, con máximas de 45.7°C en septiembre, y mínimas de 4.3°C en diciembre.

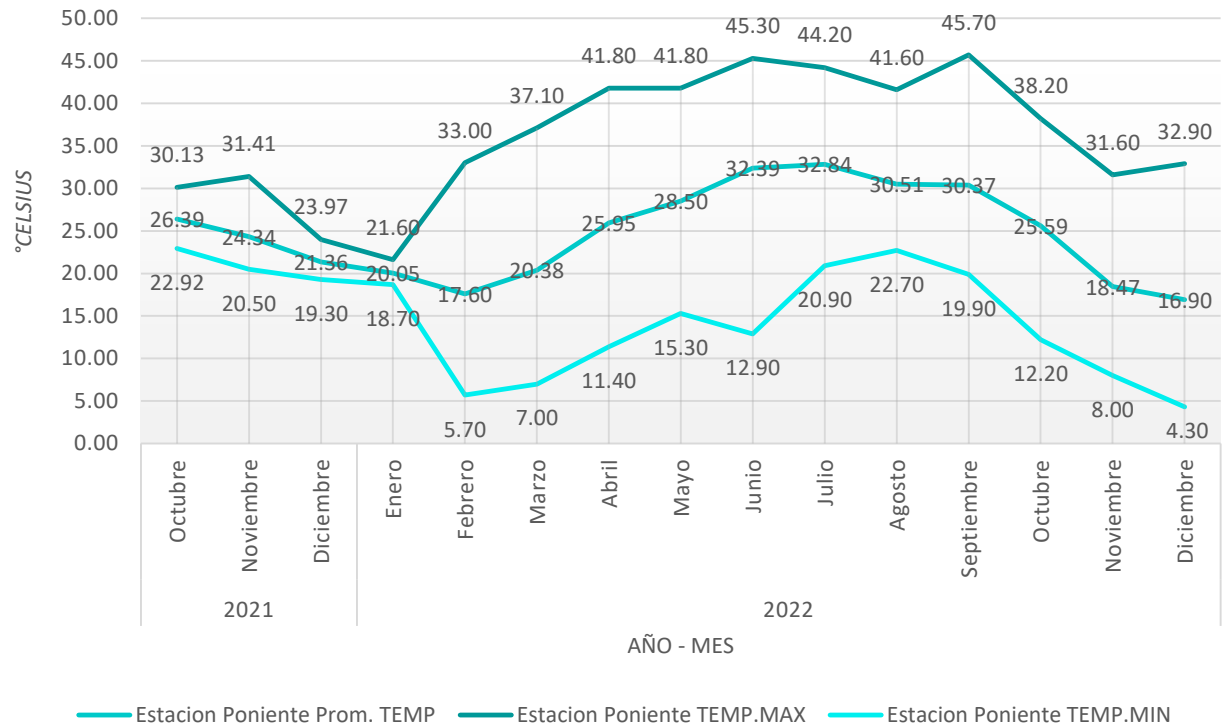


Figura 14. Poniente. Temperaturas máximas/promedios/mínimas. La línea superior (oscura) representa el promedio de temperaturas máximas, la línea media color cian representa la temperatura promedio. La línea inferior (clara) representa el promedio de la temperatura mínima.
Fuente: Elaboración propia con datos de la estación de monitoreo Ambient Weather 2000.

La oscilación de la temperatura y la sensación térmica (Figura 14) es mayor en junio, julio y agosto, justo cuando la diferencia entre el punto de rocío y la temperatura promedio son menores, correspondiendo a los meses más húmedos del año. En cambio, el punto de rocío y el promedio de temperatura tienen una mayor diferencia en los meses de marzo, abril y mayo cuando se presenta el periodo seco.

Para la estación *norponiente* se presentó durante el periodo de marzo 2022 a diciembre 2022, una temperatura promedio de 25.98°C, con máximas de 43.8°C registrada en julio, y mínimas de 3.7°C en diciembre.

La oscilación de la temperatura al norponiente (Figura 15) disminuye en el periodo húmedo, y aumenta en el periodo seco. En el periodo frío la oscilación se mantiene alta con ligeras disminuciones que suceden al aumentar la humedad.

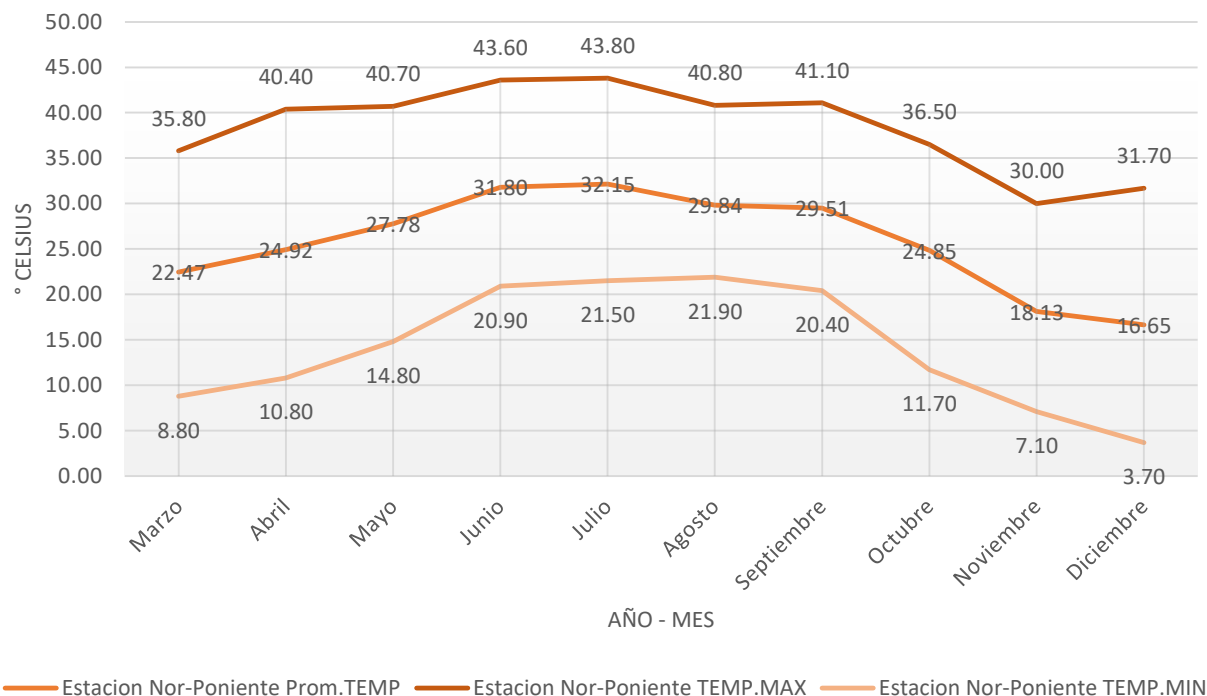


Figura 15. Norponiente, Temperatura máximas/promedios/mínimas. La línea superior, color oscuro, representa máximos de temperatura en °C, los márgenes la línea media representa el promedio de temperatura y la línea inferior, color claro, representa los mínimos de temperatura. Fuente: Elaboración propia con datos de la estación de monitoreo Ambient Weather 2000 instalada en Norponiente.

El comportamiento general de la temperatura registrada en las estaciones de **CONAGUA, poniente y norponiente** durante el periodo de monitoreo de octubre de 2021 a diciembre 2022 (Figura 16), nos indica que la temperatura promedio es de 25.01°C, donde la estación poniente presento el promedio más alto de 25.98°C y la de **CONAGUA** el más bajo con 24.27°C. La máxima fue registrada fue de 47.07°C en la estación **poniente** y la mínima de 3.07°C en la estación **norponiente**.

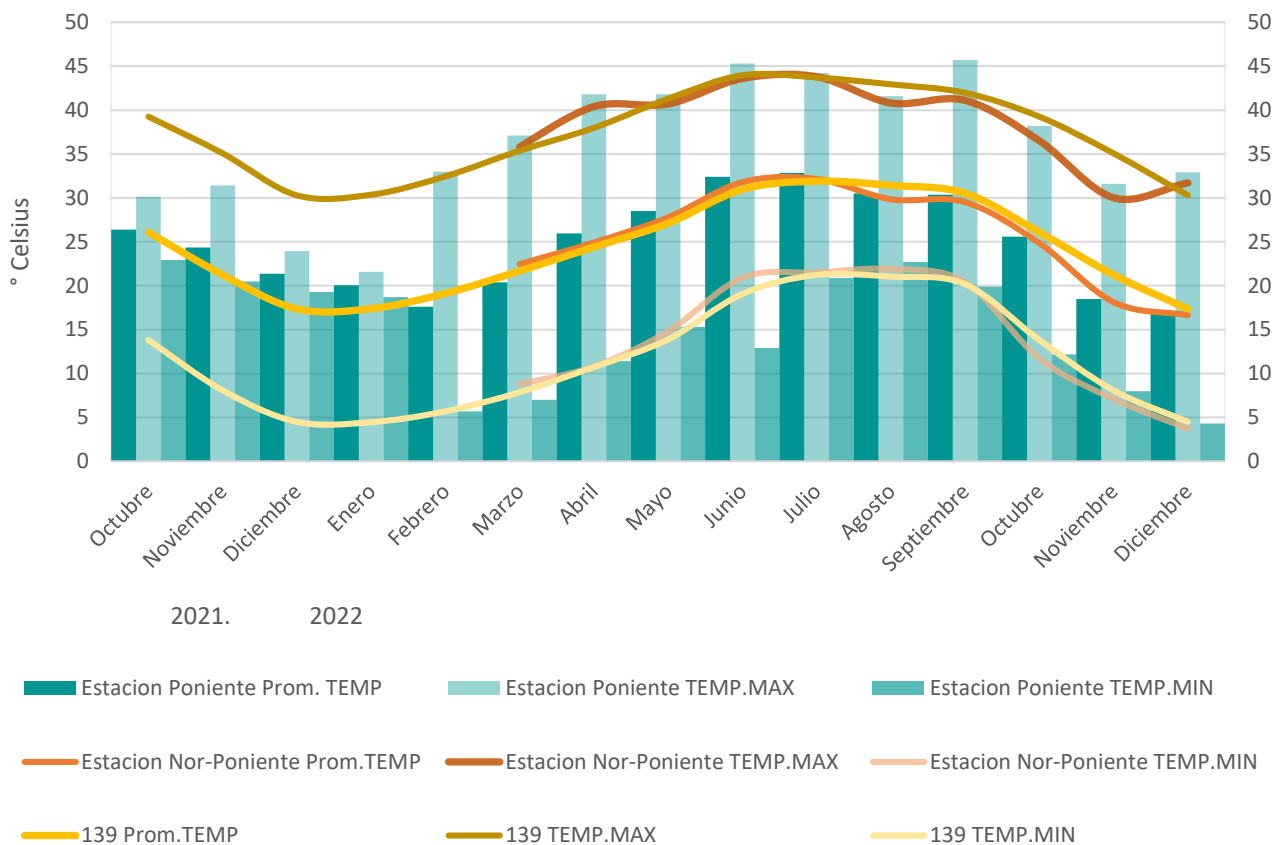


Figura 16. Comportamiento de la temperatura entre las diferentes estaciones. La línea punteada representa los registros de la estación 26139, promedios, máximos y mínimos del mismo periodo, mientras que las líneas sólidas caracterizan a la estación **norponiente** promedios, máximos y mínimos, y las barras a la estación **poniente**, promedios, máximos y mínimos que se pueden distinguir por la tonalidad de la barra. Fuente: Elaboración propia con base en los registros de las estaciones de monitoreo instaladas en Poniente, Norponiente y registros de la estación 26-139 de CONAGUA.

1.2. Precipitación y Humedad.

Se registró el comportamiento de las lluvias, la humedad y la presión relativa de la estación **poniente**. Se proporcionan datos sobre la humedad promedio mensual, la humedad máxima registrada, la humedad mínima registrada y la cantidad de lluvia en un período de tiempo que abarca desde octubre de 2021 hasta diciembre de 2022.

El comportamiento de la humedad registra una saturación promedio del 44.79%, con un periodo seco en los meses de febrero hasta principios de junio, un periodo con saturaciones altas de humedad desde finales de junio hasta octubre y nuevamente en diciembre, disminuye hasta llegar el periodo seco.

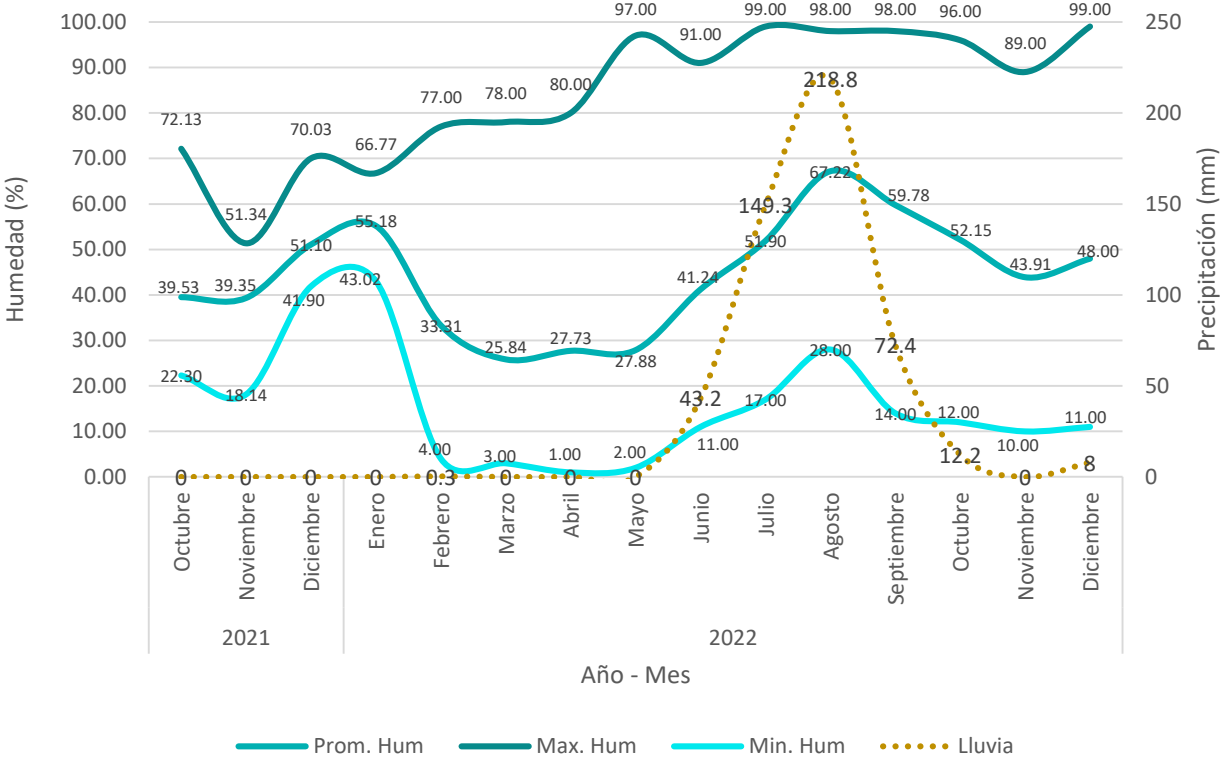


Figura 17. Poniente. Promedio (Prom.Hum), máximos (Max.Hum) y mínimos (Min.Hum) mensuales de Humedad y lluvias. La línea superior (oscura) representa el promedio de humedad máximas, la línea media color cian representa la humedad promedio. La línea inferior (clara) representa el promedio de la humedad mínima, La línea punteada representa los mm de lluvia precipitados por mes. Fuente: elaboración propia con los datos de la estación de monitoreo Ambient Weather 2000 instalada en Poniente.

Las precipitaciones que se presentaron al poniente (Figura 17) se concentran el 98% en el periodo húmedo de verano, siendo agosto el mes con mayor precipitación, seguido de julio. Un 2% se presentó en los meses fríos de diciembre y febrero. La precipitación total del año 2022 en la estación poniente fue de 504.2 mm, que está por encima del promedio registrado para Hermosillo.

Por otro lado, la estación *norponiente* monitoreo en un periodo de marzo del 2022 hasta diciembre 2022, registrando máximos, mínimos, y promedios de humedad, presión relativa y precipitación, mismo que se muestra en la tabla 9.

Se registraron un promedio de 44.35% de saturación de humedad en el ambiente para el norponiente (Figura 18), las máximas se presentaron en los meses de agosto y septiembre. Las mínimas en marzo, abril y mayo que corresponden a los meses secos. Los niveles medios de saturación se presentaron en los meses fríos.

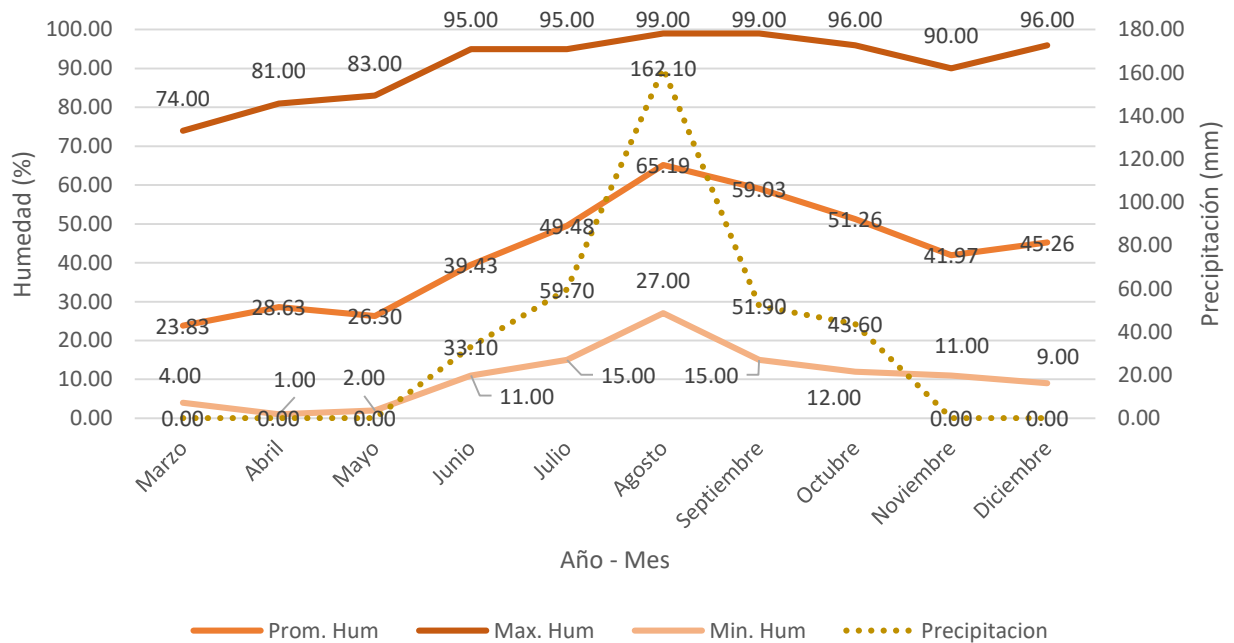


Figura 18 Norponiente. Promedio (Prom.Hum), máximos (Max.Hum) y mínimos (Min.Hum) mensuales de Humedad y lluvias. La línea superior (oscura) representa el promedio de humedad máximas, la línea media color naranja representa la humedad promedio. La línea inferior (clara) representa el promedio de la humedad mínima, La línea punteada representa los mm de lluvia precipitados por mes. Fuente: elaboración propia con datos de la estación de monitoreo Ambient Weather 2000 instalada en Norponiente.

Las precipitaciones registradas en la estación *norponiente* (Figura 18) suman 350.4 mm, donde las lluvias empiezan a presentarse a finales de junio, y siendo agosto el mes más lluvioso, seguido de julio, septiembre y octubre, del periodo húmedo. El resto de los meses registraron precipitación de 0.

El comportamiento de los datos de humedad y precipitación para ambas estaciones (Figura 19), muestra que en promedio la estación poniente presenta una humedad ligeramente más alta que el norponiente. La humedad máxima registrada en el norponiente tiene a ser mayor que al poniente la mayor parte del año. Los mínimos que presentan ambas estaciones varían ligeramente entre los meses.

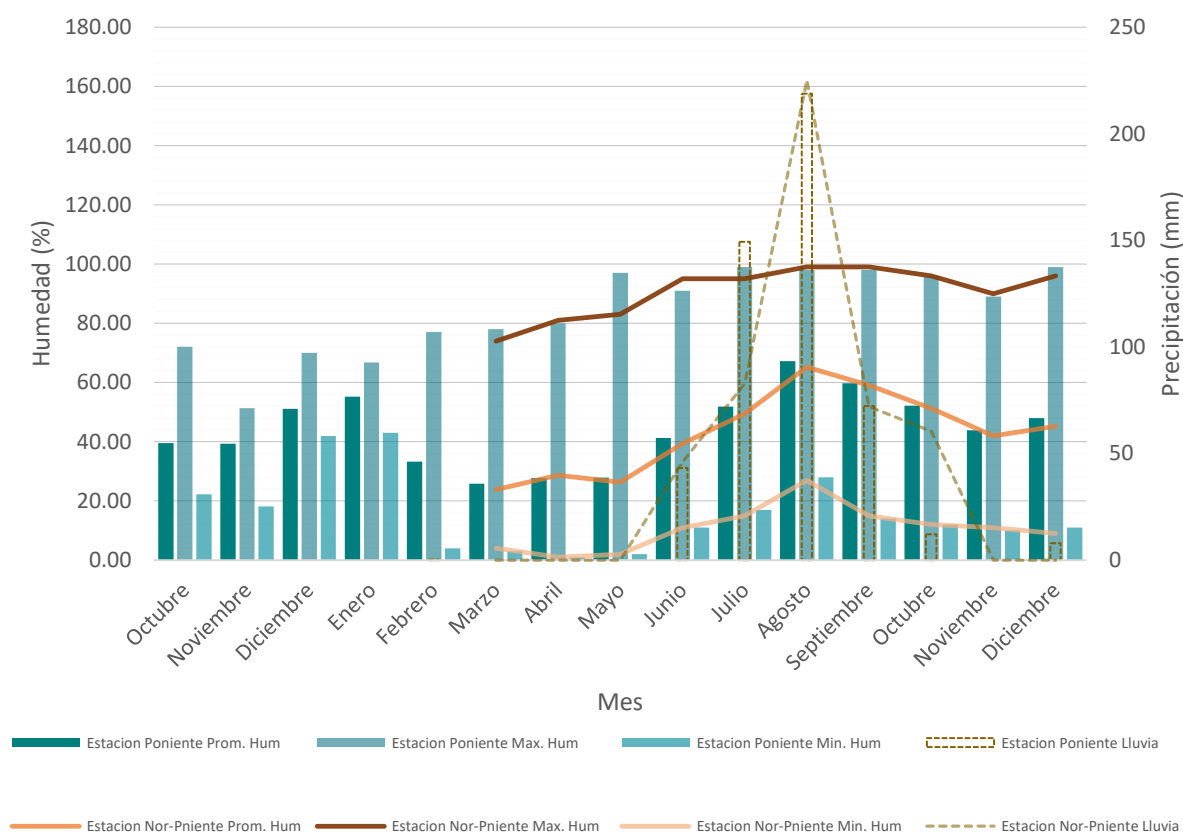


Figura 19. Comportamiento de Promedios, máximos y mínimos mensuales entre la Estaciones para los parámetros de Precipitación y Humedad. Las barras representan los datos de la estación poniente, promedios, máximos y mínimos son las barras sólidas y la precipitación es representada por la barra punteada. Los datos representados con líneas pertenecen a la estación norponiente donde las líneas continuas representan promedios, máximos y mínimos de humedad y la línea punteada representa la precipitación. Fuente: Estación de monitoreo Ambient Weather 2000 instalada en Poniente y Norponiente.

1.3. Velocidad, dirección y frecuencia del viento.

Se presentan los datos sobre la dirección, velocidad y frecuencia del viento registrados durante el periodo de octubre 2021 y diciembre 2022. La velocidad del viento varía considerablemente entre los meses y las direcciones registradas. La velocidad promedio del viento se encuentra en el rango de 1.17 a 4.60 km/hr, con un promedio general de 2.84 km/hr. En algunos meses, como junio, julio y agosto, se registraron velocidades del viento más altas, con valores máximos de ráfaga que alcanzaron hasta 12.05 km/hr.

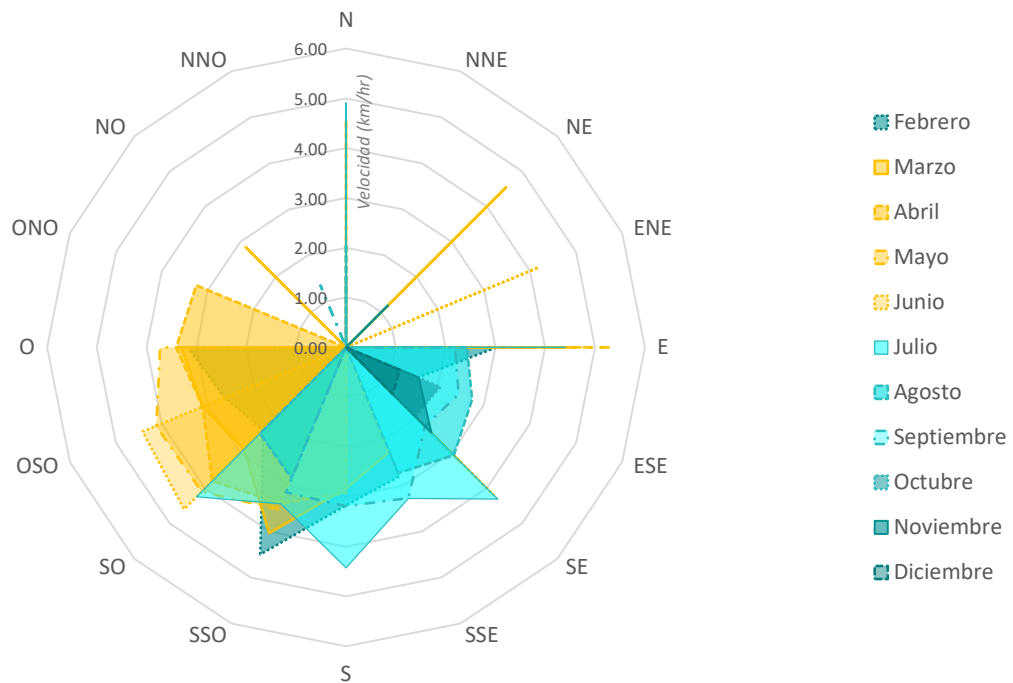


Figura 20 Poniente. Dirección, velocidad del viento mensual. La gráfica representa la relación entre la dirección y la velocidad del viento y los polígonos los meses donde ocurrió la medición. Los meses fríos registrados; febrero, noviembre y diciembre se representan de color oscuro, diferenciando por el patrón de línea sólida. Los meses secos registrados; marzo, abril, mayo y junio se representan de color amarillo, pudiendo diferenciarse por el patrón de línea punteada que se distingue en la simbología. Los meses húmedos; julio, agosto, septiembre y octubre son representados de tonos cian claros pudiendo distinguirlos por el patrón de línea que se puede tomar de referencia en la simbología. Fuente: Elaboración propia con datos de la estación de monitoreo Ambient Weather 2000 instalada en Poniente.

Durante el periodo frío las velocidades promedio (Figura 20) más altas de 4.5 km/hr se presentan del SSO en febrero, las mínimas de 1.17 km/hr provenían del ESE en diciembre, se registró un promedio de 1.85 km/hr para este periodo.

En el periodo húmedo el promedio de velocidad máximo registrado fue de 4.91 km/hr de dirección N presentándose en julio, el promedio mínimo fue de 1.35 km/hr proveniente de dirección NNE en septiembre. Se registró un promedio de 3.38 km/hr en el periodo húmedo.

Para el periodo seco el promedio de velocidad más alto registrado fue de 5.31 km/hr de dirección E, mismo que se presentó en el mes de mayo, el promedio mínimo de 2.01 km/hr provenía de dirección E en marzo. El periodo seco presentó una velocidad promedio de 3.83 km/hr.

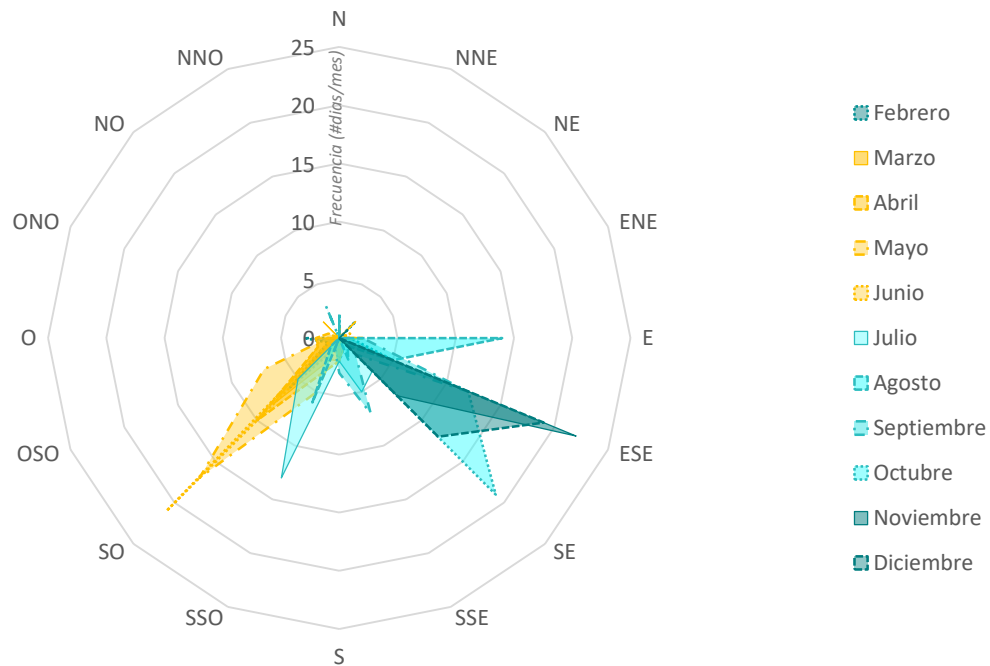


Figura 21 Poniente. Frecuencia de la Dirección de viento. La grafica representa la relación entre la dirección del viento y la frecuencia diaria con la que se repitió, y los polígonos los meses donde ocurrió la medición. Los meses fríos registrados; febrero, noviembre y diciembre se representan de color oscuro, diferenciando por el patrón de línea sólida. Los meses secos registrados; marzo, abril, mayo y junio se representan de color amarillo, pudiendo diferenciarse por el patrón de línea punteada que se distingue en la simbología. Los meses húmedos; julio, agosto, septiembre y octubre son representados de tonos cian claros pudiendo distinguirlos por el patrón de línea que se puede tomar de referencia en la simbología. Fuente: elaboración propia con datos de la estación de monitoreo Ambient Weather 2000 instalada en Poniente.

La dirección de los vientos dominantes (Figura 21), nos indica que para los meses fríos la frecuencia de los vientos ESE domina sobre el resto de las direcciones, casi todo el mes de noviembre y diciembre los vientos provenían del ESE y SE, para el mes de febrero se presentó mayor variabilidad en los datos registrando también vientos del SO y O.

En los meses húmedos se registra la mayor variabilidad de la dirección de los vientos con respecto a la frecuencia con la que se presenta, siendo los vientos del ESE los que dominaron en el periodo, seguidos de los vientos del SE que se presentaron en septiembre y octubre, sin embargo, en julio la frecuencia de los vientos provenía del SO y para agosto la dirección se presenta del Este.

Los meses secos donde se presentan las velocidades máximas, se presentaron con mayor frecuencia del SO, pudiendo notar un ascenso en la frecuencia desde mayo siendo la más baja hasta dominar casi durante todo junio. Seguido del OSO que domino en abril.

En el caso de la estación *norponiente* se registró desde marzo 2022 hasta diciembre 2022 los promedios de las velocidades del viento por mes de cada dirección que se presentó. También se registra la frecuencia en la dirección que se presentó en cada mes.

La velocidad del viento al norponiente varía considerablemente entre los meses del año, sin embargo, la dirección registrada muestra poca variabilidad entre N, NNE, NE, NNO, NO. En general, la velocidad promedio del viento se encuentra en un rango de 1.31 a 6.05, con un promedio general de 3.08 km/hr.

Durante casi todo el año las velocidades máximas se registran en dirección NNE, algunos meses, como marzo, junio, julio, septiembre y noviembre se registraron velocidades de más de 12 km/hr, con valores máximos de ráfaga que alcanzaron hasta 16.2 km/hr en noviembre.

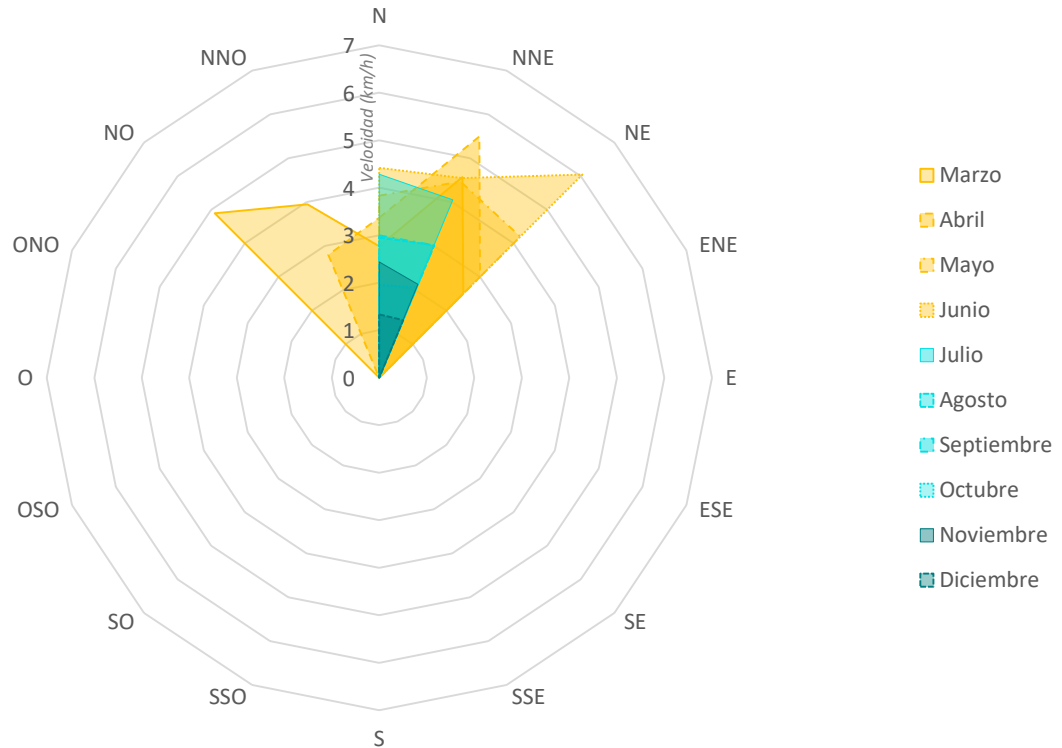


Figura 22 Norponiente. Dirección y velocidad del viento registrados. La gráfica representa la relación entre la dirección y la velocidad del viento y los polígonos los meses donde ocurrió la medición. Los meses fríos registrados; febrero, noviembre y diciembre se representan de color oscuro, diferenciando por el patrón de línea sólida. Los meses secos registrados; marzo, abril, mayo y junio se representan de color amarillo, pudiendo diferenciarse por el patrón de línea punteada que se distingue en la simbología. Los meses húmedos; julio, agosto, septiembre y octubre son representados de tonos cian claros pudiendo distinguirlos por el patrón de línea que se puede tomar de referencia en la simbología. Fuente: elaboración propia con datos de la estación de monitoreo Ambient Weather 2000 instalada en Norponiente.

Durante el periodo frío las velocidades del viento (Figura 22) promedio más altas de 2.44 km/hr se presentan del N en noviembre, las mínimas de 1.31 km/hr provenían del NNE en diciembre, se registró un promedio de 1.8 km/hr para este periodo.

En el periodo húmedo el promedio de velocidad máximo registrado fue de 4.28 km/hr de dirección N presentándose en julio, el promedio mínimo fue de 1.95 km/hr provenía de dirección N en octubre. Se registró un promedio de 3.04 km/hr en el periodo húmedo.

Para el periodo seco el promedio de velocidad más alto registrado fue de 6.05 km/hr de dirección N en junio, el promedio mínimo fue de 2.5 km/hr proveniente de dirección NE en marzo. El periodo seco presentó una velocidad promedio de 4.15 km/hr.

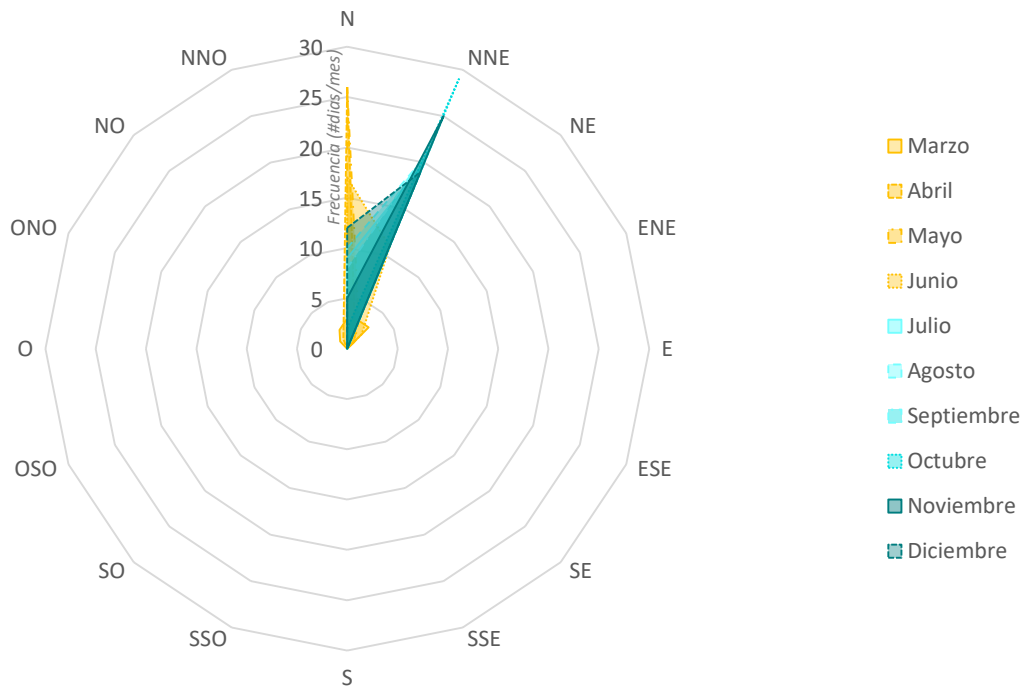


Figura 23 Norponiente. Dirección de la frecuencia del viento. La gráfica representa la relación entre la dirección del viento y la frecuencia con la que se repitió, y los polígonos los meses donde ocurrió la medición. Los meses fríos registrados; febrero, noviembre y diciembre se representan de color oscuro, diferenciando por el patrón de línea sólida. Los meses secos registrados; marzo, abril, mayo y junio se representan de color amarillo, pudiendo diferenciarse por el patrón de línea punteada que se distingue en la simbología. Los meses húmedos; julio, agosto, septiembre y octubre son representados de tonos cian claros pudiendo distinguirlos por el patrón de línea que se puede tomar de referencia en la simbología. Fuente: elaboración propia con datos de la estación de monitoreo Ambient Weather 2000 instalada en Norponiente.

Los meses húmedos se observa vientos del NNE como predominantes (Figura 23) con velocidades promedio entre 2.95 y 6.05 km/hr, alcanzando ráfagas de hasta 12.9 km/h. En los meses fríos se presentaron vientos dominantes de NNE con velocidades promedio entre 1.31 y 2.44 km/hr, por debajo de la media, sin embargo, fue en este periodo donde se presentaron las ráfagas de

hasta 16.2 km/hr. En los meses secos los vientos de dirección NNE dominaron, con velocidades promedio que oscilan entre 2.5 y 6.5 km/hr, y ráfagas de hasta 12.4 km/hr.

1.4. Radiación Solar.

Se registraron valores de radiación en w/m^2 desde febrero 2022 hasta diciembre 2022. Para cada mes se maneja el valor máximo y el promedio que se presentó en la estación poniente y norponiente, la columna final se muestra el máximo y los promedios generales.

Los valores que presenta la estación poniente muestran un promedio que oscila entre 93.13 y 299.32 w/m^2 y una media de 209.57 con una máxima de 415.64 w/m^2 registrado en junio.

Los valores mensuales de la estación *norponiente* muestran un promedio entre 101 y 259.03 y una media de 202.43 w/m^2 , con una máxima de 353.1 w/m^2 registrada en agosto.



Figura 24 Promedios de Radiación solar mensual. La gráfica muestra el comportamiento mensual, donde la línea cian representa los valores para la estación poniente, y la línea amarilla los de la estación Norponiente. Fuente: elaboración propia con datos de la estación de monitoreo Ambient Weather 2000 instalada en Poniente y Norponiente.

Se presentó un promedio general en la zona poniente de 206.22 w/m^2 , con promedios más altos en la temporada seca en la estación Poniente, durante el periodo húmedo la brecha entre ambas disminuye y para el periodo frío la estación *Norponiente* presento los promedios más altos (Figura 24).

La radiación solar muestra un comportamiento típico de la zona por su forma de campana, alcanzando los promedios máximos en periodo seco en el mes de mayo, donde los días son más largos, y los más bajos en el periodo frío en el mes de diciembre, cuando los días son más cortos (Figura 24).

2. Calidad del aire

A continuación, se muestran los resultados de las muestras obtenidas de estaciones del programa PEMCA para PM_{10} del periodo 2016 – 2022 y de las estaciones instaladas para PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ y PM_1 desde octubre 2021 hasta diciembre 2022.

2.1. Estaciones PEMCA

La estación norte ubicada en la **Universidad Estatal de Sonora** registró un promedio general de PM_{10} de $41.92 \mu\text{g/m}^3$ para el periodo 2016 al 2022 (Tabla 5) superando el máximo permisible anual promedio de $40 \mu\text{g/m}^3$. Los promedios mensuales por año indican que el mes de agosto registra las concentraciones más bajas con $21.86 \mu\text{g/m}^3$ y noviembre las más altas con $66.24 \mu\text{g/m}^3$.

Tabla 5 Promedios mensuales de PM₁₀ en la estación UES (norte).

<i>Mes</i>	<i>2016</i>	<i>2017</i>	<i>2018</i>	<i>2019</i>	<i>2020</i>	<i>2021</i>	<i>2022</i>	<i>Promedio mensual</i>
<i>Enero</i>	53.50	45.36	63.76	33.54	57.88	46.13	55.01	50.74
<i>Febrero</i>	64.04	34.94	35.58	43.46	40.45	60.07	40.30	45.55
<i>Marzo</i>	44.44	67.36	51.14	36.25	26.19	43.38	33.30	43.15
<i>Abril</i>	30.20	42.42	60.00	21.68	23.14	32.90	43.78	36.30
<i>Mayo</i>	42.10	39.85	37.13	22.97	24.16	29.66	44.71	34.37
<i>Junio</i>	50.78	49.70	33.29	27.98	30.00	33.50	31.48	36.68
<i>Julio</i>	29.10	23.80	22.25	25.89	19.70	20.82	22.23	23.40
<i>Agosto</i>	26.60	21.66	20.73	21.14	24.12	22.36	16.40	21.86
<i>Septiembre</i>	30.30	29.99	26.17	26.43	37.17	22.07	23.70	27.97
<i>Octubre</i>	56.78	68.62	64.93	67.14	39.95	49.24	28.40	53.58
<i>Noviembre</i>	48.33	73.94	62.71	61.92	75.13	76.03	65.61	66.24
<i>Diciembre</i>	87.84	67.17	57.47	39.97	48.60	70.32	70.70	63.15
<i>Promedio anual</i>	47.00	47.07	44.60	35.70	37.21	42.21	39.64	41.92

Fuente: PEMCA

Los valores de la tabla 13 de las celdas de color rojo superaron los límites máximos permisibles correspondientes al año de las muestras. Los valores en rojo corresponden a diciembre del 2016 y 2022 (Figura 25), así como noviembre del 2020 y 2021 superaron el límite permisible de 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En promedio los meses con mayores concentraciones de PM₁₀ son noviembre y diciembre (Tabla 5).

En cuanto a los promedios anuales, el 2017 ha sido el año con los registros más altos, seguidos del 2016 y 2018 superado el límite máximo permisible anual de 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. El 2022 registro un promedio anual por encima de los límites permisibles para ese año de 36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Con datos a partir de las muestras tomadas en la estación Sur (Tabla 6), ubicada en el plantel **COBACH**, en Villa de Seris, registró una concentración de PM₁₀ promedio durante el periodo de 36.71 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, de los cuales, agosto obtiene las más bajas concentraciones con 20.02 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y noviembre las más altas con 46.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Tabla 6 Promedio mensual de PM₁₀ de la Estación COBACH (sur).

<i>Mes</i>	<i>2016</i>	<i>2017</i>	<i>2018</i>	<i>2019</i>	<i>2020</i>	<i>2021</i>	<i>2022</i>	<i>Promedio mensual</i>
<i>Enero</i>	66.88	29.81	62.10	46.66	44.88	32.51	18.97	43.12
<i>Febrero</i>	63.96	31.28	27.96	43.96	35.45	39.52	10.07	36.03
<i>Marzo</i>	45.54	53.23	39.80	37.56	37.20	49.05	9.87	38.89
<i>Abril</i>	36.50	48.92	70.56	34.60	29.01	34.54	7.96	37.44
<i>Mayo</i>	49.90	42.63	61.70	45.72	35.73	34.18	8.67	39.79
<i>Junio</i>	53.88	61.04	60.82	43.58	24.30	27.91	6.73	39.75
<i>Julio</i>	44.70	35.35	42.53	32.97	28.85	17.88	6.50	29.83
<i>Agosto</i>	23.65	32.53	16.07	23.96	21.39	14.55	8.00	20.02
<i>Septiembre</i>	27.70	34.03	19.52	26.84	24.46	18.10	11.65	23.19
<i>Octubre</i>	51.72	91.90	45.28	52.24	45.28	8.31	27.51	46.03
<i>Noviembre</i>	49.21	83.78	55.99	51.02	44.26	7.58	33.68	46.50
<i>Diciembre</i>	54.07	65.42	30.34	26.97	44.87	16.76	41.07	39.93
<i>Promedio anual</i>	47.31	50.83	44.39	38.84	34.64	25.08	15.89	36.71

Fuente: PEMCA

Los meses de octubre y noviembre del 2017 superaron el límite permisible de 75 µg/m³, ha sido noviembre, seguido de octubre los meses que en promedio han registrado los valores más altos de la estación sur (Tabla 6).

En cuanto a los promedios anuales (Tabla 6), el 2017 ha sido el año con el registro más alto, seguido del 2016 y 2018 los años que han superado el límite máximo permisible anual de 40 µg/m³.

A partir de las muestras tomadas de la estación ubicada en la **Villa Bonita** (Tabla 7), se registró un promedio en la concentración de PM₁₀ de 44.29 µg/m³ durante el periodo estudiado (2016-2022), superando el máximo permisible anual promedio de 40 µg/m³, al igual que los años 2016, 2017, 2018, 2019 y 2020. Los promedios mensuales registran a agosto como el mes más bajo con 19.57 µg/m³ y diciembre como el más alto con 64.57 µg/m³.

Tabla 7 Promedio mensual de PM₁₀ de la estación Villa Bonita (sur-poniente).

<i>Mes</i>	<i>2016</i>	<i>2017</i>	<i>2018</i>	<i>2019</i>	<i>2020</i>	<i>2021</i>	<i>2022</i>	<i>Promedio mensual</i>
<i>Enero</i>	56.10	42.34	95.43	66.85	49.52	43.12	39.80	56.16
<i>Febrero</i>	64.02	34.23	49.83	74.28	59.18	49.98	27.55	51.30
<i>Marzo</i>	44.65	64.62	39.85	45.12	43.53	34.65	23.41	42.26
<i>Abril</i>	31.42	43.68	84.61	86.40	54.96	37.79	28.68	52.51
<i>Mayo</i>	43.61	61.10	97.15	25.41	57.84	40.77	29.50	50.77
<i>Junio</i>	51.38	81.39	38.35	19.70	51.27	34.66	21.05	42.54
<i>Julio</i>	32.13	42.65	17.02	18.57	30.12	22.60	15.57	25.52
<i>Agosto</i>	26.03	28.23	14.39	15.33	22.37	17.79	12.85	19.57
<i>Septiembre</i>	29.80	37.84	19.49	20.58	28.75	23.43	18.61	25.50
<i>Octubre</i>	55.80	95.65	21.26	24.99	52.86	31.97	28.02	44.36
<i>Noviembre</i>	48.50	137.37	26.41	31.70	51.26	47.15	52.13	56.36
<i>Diciembre</i>	81.29	101.13	47.76	61.23	54.66	47.72	58.20	64.57
<i>Promedio anual</i>	47.06	64.19	45.96	40.85	46.36	35.97	29.61	44.29

Fuente: PEMCA

Los meses de enero del 2018, abril del 2018 y 2019, mayo del 2018, junio del 2017, octubre, noviembre y diciembre del 2017, así como diciembre del 2016 superaron el límite permisible de 75 µg/m³, siendo el mes de noviembre de 2017 el promedio más alto registrado por el programa PEMCA (Tabla 7). Es diciembre donde en promedio la estación ha obtenido más altos niveles de PM₁₀.

En cuanto a los promedios anuales, el 2017 ha sido el año con los registros más altos (Tabla 7), seguidos del 2020, 2016, 2018 y 2019 los años que han superado el límite máximo permisible anual de 40 µg/m³.

2.2. Estaciones de particulado atmosférico instalados en este proyecto

Se muestran los valores promedio de PM₁₀ registrados en la estación poniente durante el periodo de octubre 2021 hasta diciembre 2022 obtenidas con los sensores instalados durante este proyecto, se presentan los promedios por hora de cada mes donde (Tabla 8):

- “hr” representa las horas del día, donde 1:00 registra los valores promedio desde las 0:01 hasta la 1:00, las 2:00 desde la 1:01 hasta las 2:00 y así sucesivamente hasta las 24 horas.

- “Oct”, “Nov”, “Dic”...: Corresponden a los meses que indican el promedio mensual en que se presentó en la hora indicada.
- “Promedio Mes” representa el promedio mensual general.
- “Prom.hr” Es el promedio general que se presentó en la hora correspondiente.

El promedio general de PM₁₀ registrados en la estación poniente es de 12.20 µg/m³, donde enero presento los promedios más altos con 21.81 µg/m³ y julio los más bajos con 5.15 µg/m³.

Tabla 8 Poniente. Promedios mensuales de PM₁₀ por hora.

<i>Hr</i>	<i>Oct</i>	<i>Nov</i>	<i>Dic</i>	<i>Ene</i>	<i>Feb</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>May</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Sep</i>	<i>Oct</i>	<i>Nov</i>	<i>Dic</i>	<i>Prom .hr</i>
1:00	19.36	25.48	24.58	25.33	20.46	15.26	15.20	14.79	10.09	6.01	5.65	5.79	22.64	30.48	33.82	18.33
2:00	20.09	25.79	23.40	24.17	24.76	19.39	17.51	17.19	8.37	6.67	6.60	10.05	22.95	24.14	31.73	18.85
3:00	21.90	18.98	22.89	24.03	25.46	25.13	19.84	18.63	14.16	6.57	7.11	9.71	17.79	18.45	31.38	18.80
4:00	19.85	15.52	21.05	21.38	20.83	24.40	20.30	19.38	12.22	8.24	6.95	8.40	15.11	17.09	27.25	17.20
5:00	15.23	16.48	19.69	19.38	18.39	24.19	21.48	19.45	15.21	8.15	6.89	7.03	14.18	14.50	27.92	16.54
6:00	14.69	13.46	18.14	17.89	17.99	21.45	25.35	18.46	12.87	8.26	7.00	8.16	12.30	13.73	23.04	15.52
7:00	13.57	12.44	17.05	15.93	16.92	20.38	22.95	15.97	12.68	7.53	7.67	8.55	12.41	15.94	22.91	14.86
8:00	14.14	16.94	17.51	16.69	21.11	18.56	18.64	14.06	11.26	7.01	6.72	8.46	14.63	17.86	24.15	15.18
9:00	12.48	11.73	15.20	18.55	18.47	14.31	14.04	11.35	8.68	6.10	6.57	8.12	14.42	15.19	21.76	13.13
10:00	10.50	12.73	18.20	21.73	12.46	10.84	10.10	9.31	7.15	5.39	5.54	7.67	16.51	12.92	18.63	11.98
11:00	7.55	10.50	19.25	20.69	9.46	7.02	7.35	7.31	5.97	4.76	5.30	8.57	14.37	9.06	13.44	10.04
12:00	5.48	8.56	24.37	26.30	7.21	5.85	5.70	4.17	4.94	4.29	4.40	15.10	10.95	7.22	11.06	9.71
13:00	4.16	6.48	22.30	23.73	4.73	3.48	4.39	3.29	4.89	3.78	4.03	13.78	11.58	4.80	8.81	8.28
14:00	3.73	5.10	20.42	22.31	3.83	2.64	3.92	3.06	4.66	3.43	3.71	19.50	8.11	3.96	7.51	7.73
15:00	4.02	7.46	24.84	22.56	3.13	2.36	3.74	3.10	4.57	3.15	3.35	4.01	7.93	3.38	7.48	7.01
16:00	3.64	6.71	23.23	21.24	2.28	1.79	3.40	3.33	6.44	3.16	3.55	2.30	4.03	3.46	7.83	6.43
17:00	3.96	5.21	19.15	17.64	2.08	2.27	3.68	3.94	6.43	3.15	3.45	5.29	3.93	3.14	8.37	6.11
18:00	4.31	5.81	17.98	19.81	2.68	1.66	3.81	3.81	5.67	3.12	2.77	26.01	7.08	5.18	9.27	7.93
19:00	6.05	5.88	18.68	22.65	4.79	2.56	4.47	3.33	5.17	3.17	3.22	7.65	11.53	6.70	11.49	7.82
20:00	5.16	10.02	19.65	20.12	7.80	4.10	5.15	4.02	5.66	3.77	3.79	8.80	11.05	7.80	12.44	8.62
21:00	7.93	11.71	23.85	20.41	9.40	4.84	6.48	4.99	6.36	4.01	4.75	7.87	10.69	9.34	17.97	10.04
22:00	10.76	13.92	22.57	25.59	13.22	6.30	7.46	6.39	6.24	4.49	4.82	8.10	12.67	11.55	22.84	11.80
23:00	11.70	15.31	24.49	26.36	13.09	10.85	9.15	10.64	7.93	4.14	5.02	6.57	15.30	15.79	27.37	13.58
0:00	16.97	16.27	25.09	28.84	18.35	14.41	13.08	12.52	7.88	5.28	5.11	6.09	19.56	26.70	35.38	16.77
<i>Prom Mes</i>	10.68	12.30	20.98	21.81	12.45	11.08	11.07	9.69	8.15	5.15	5.17	9.22	13.33	12.52	19.33	12.20

Fuente: Estación de monitoreo Airlink Davis instalada en Poniente.

En cuanto al comportamiento horario, se detectan los valores más altos en la madrugada entre las 0:00 a 5:00, y las más bajas de las 14:00 a las 19:00.

Las horas de diciembre y enero cercanas a las 0:00 y las 3:00 registraron los valores más altos del año, y los más bajos fueron registrados en marzo cerca de las 16:00 y 18:00 horas.

Durante el periodo muestreado (Figura 25) se registraron valores altos de PM_{10} superando los $490 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en varias ocasiones. También se identifican 2 crestas que llegaron a alcanzar los $3,430 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a finales de septiembre y a inicios de octubre, fuera de los valores típicos.

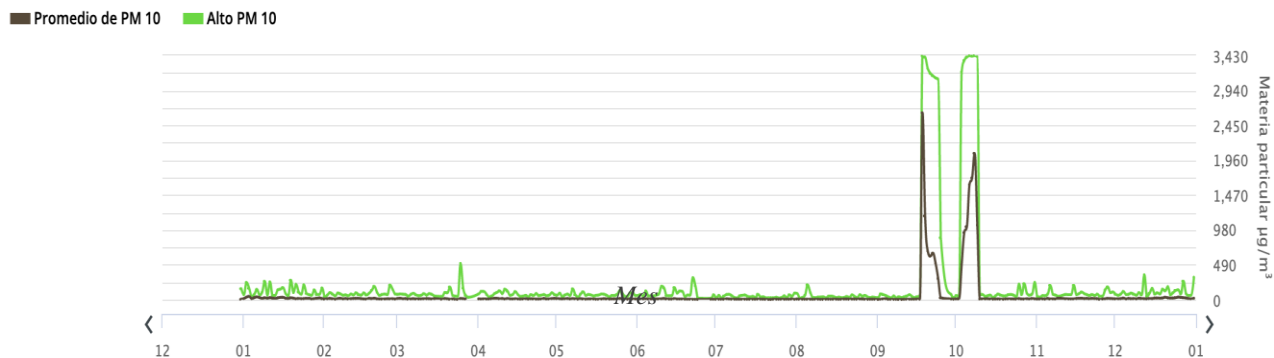


Figura 25 Poniente. Máximas y promedios de PM_{10} . La línea verde representa los máximos valores de PM_{10} registrados, y la línea oscura el promedio. Fuente: elaboración propia con datos de la estación de monitoreo Airlink Davis instalada en Poniente.

El caso del particulado atmosférico menor a 2.5μ ($PM_{2.5}$), los sensores al poniente registraron (Figura 26) un comportamiento similar a lo encontrado con las PM_{10} donde los máximos superaron en varias ocasiones los $490 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y repitiendo los aumentos anómalos a finales de septiembre e inicios de octubre con valores de hasta $3,430 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

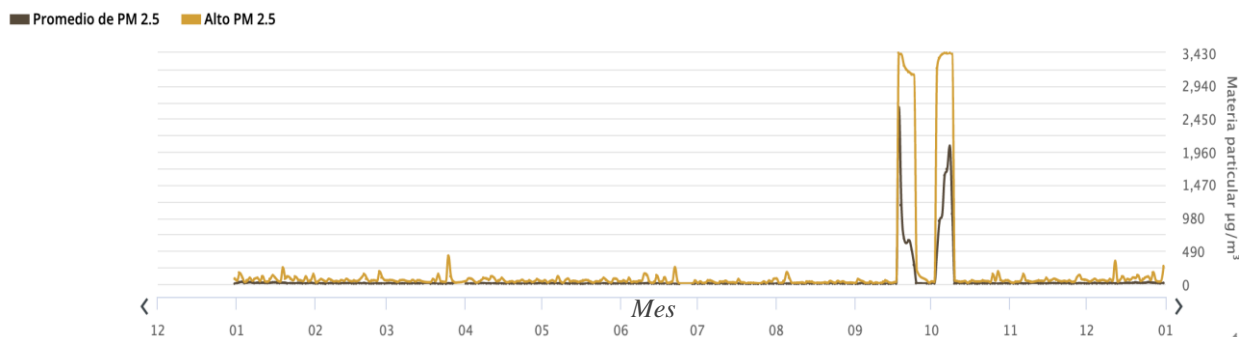


Figura 26 Poniente. Máximas y promedios de $PM_{2.5}$. La línea naranja representa los máximos valores de PM_{10} registrados, y la línea oscura el promedio. Fuente: elaboración propia con datos de la estación de monitoreo Airlink Davis instalada en Poniente.

Los datos de los sensores para el particulado más fino, menor a 1μ (PM_1) registrados en la misma estación poniente (Figura 27), coincide con el comportamiento de $PM_{2.5}$ y PM_{10} . Mostrando los mismos picos a finales de septiembre e inicio de octubre.

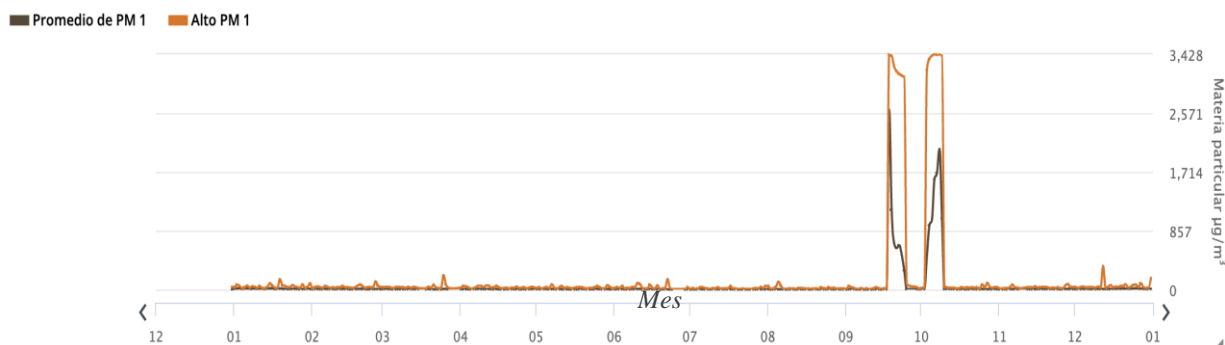


Figura 27 Poniente. Máximas y promedios de PM_1 . La línea verde representa los máximos valores de PM_{10} registrados, y la línea oscura el promedio. Fuente: elaboración propia con datos de la estación de monitoreo Airlink Davis instalada en Poniente.

En resumen, podemos observar para la estación poniente (Figura 28) todas las variables registradas por los sensores instalados. Podemos destacar dos periodos en el año donde se incrementa el material particulado de la atmosfera: 1) del 17 al 25 de septiembre y 2) del 3 al 9 de octubre del 2022.

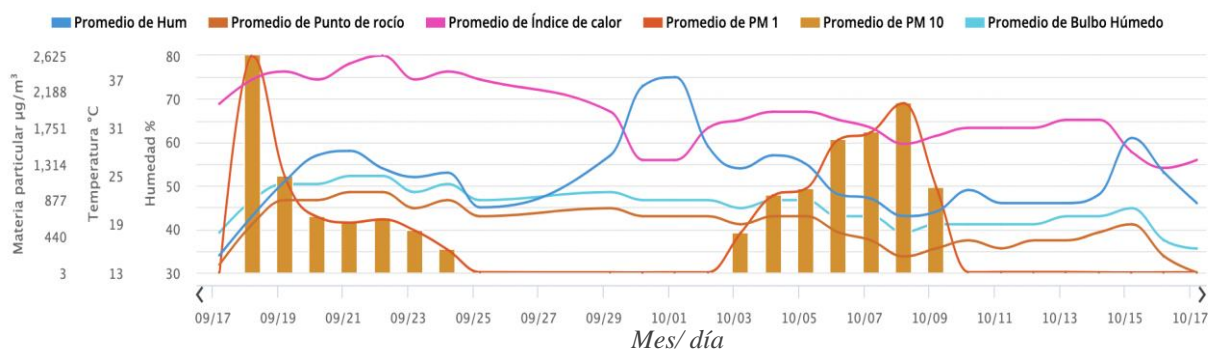


Figura 28 Poniente. Máximas y promedios de 17 de septiembre al 17 de octubre. Las barras naranjas representan el promedio de PM_{10} , la línea roja muestra el promedio de PM_1 , La línea rosa representa el índice de calor, mientras que la azul claro la temperatura de bulbo húmedo, la azul oscuro la humedad y la línea naranja el punto de rocío. Las diferentes magnitudes se encuentran del lado derecho de la gráfica. Fuente: elaboración propia con datos de la estación de monitoreo Airlink Davis instalada en Poniente.

En el caso del primer periodo del 17 al 25 de septiembre se puede observar una recurrencia de varios días presentando altos valores de particulado (Figura 29).

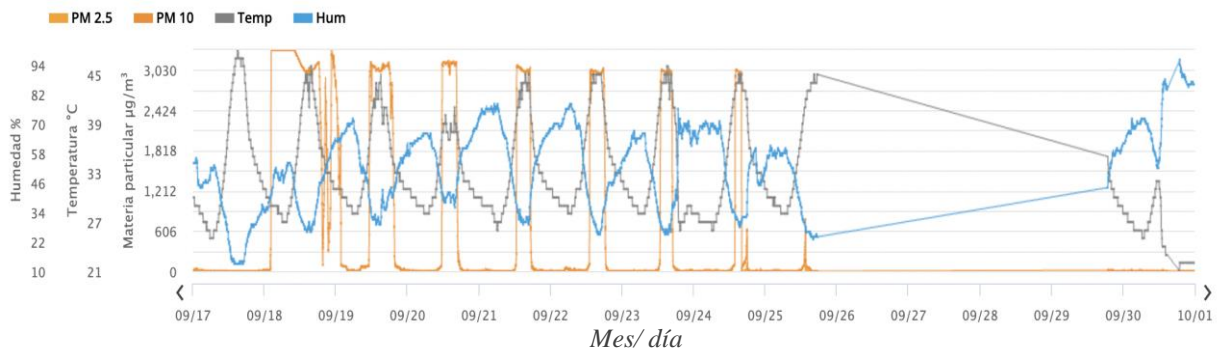


Figura 29 Máximas y promedios del 17 de septiembre a 1 de octubre de PM_{10} y $PM_{2.5}$. En la gráfica las líneas naranjas representan los promedios de PM_{10} y $PM_{2.5}$, la línea gris representa la temperatura promedio y la azul el promedio de humedad. Fuente: elaboración propia con datos de la estación de monitoreo Airlink Davis instalada en Poniente.

El comportamiento de los días (Figura 30) que presentan valores extremadamente altos en la concentración de partículas (superiores a los 3 k) indica que dichos picos se presentan a partir de las 10 am y se registra una disminución hasta niveles más normales después de las 8 pm. Lo que puede indicar sea causa de actividad antrópica.

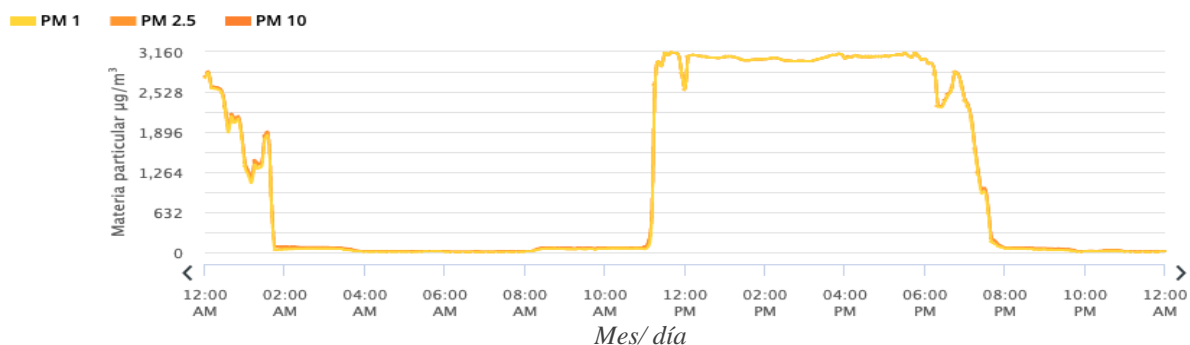


Figura 30 Poniente. Máximas y promedios de particulado durante el día 18 de septiembre. Las líneas representan el promedio de PM_{10} , $PM_{2.5}$ y PM_1 . Fuente: elaboración propia con datos de la estación de monitoreo Airlink Davis instalada en Poniente.

Los valores promedio de PM₁₀ registrados en la estación *norponiente* (Tabla 9) durante el periodo de abril 2022 hasta diciembre 2022, nos indican un valor promedio de 18.84 µg/m³, donde diciembre presentó los valores más altos con 41.92 µg/m³ superando el límite máximo permisible y julio los más bajos con 7.18 µg/m³.

Tabla 9 Promedios mensuales de PM₁₀ por hora.

<i>hr</i>	<i>Abr</i>	<i>May</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Sep</i>	<i>Oct</i>	<i>Nov</i>	<i>Dic</i>	<i>Prom.hr</i>
0:00:00	15.06	12.03	7.61	4.93	8.68	12.08	34.59	44.99	54.31	22.89
1:00:00	10.88	13.87	7.12	6.01	6.50	12.11	35.24	52.98	56.46	24.20
2:00:00	8.19	13.54	5.52	6.01	7.38	15.03	35.62	52.96	61.56	25.03
3:00:00	7.63	12.77	4.78	6.00	8.68	15.20	38.49	59.48	68.94	27.17
4:00:00	7.63	11.73	4.52	6.59	9.56	20.57	35.59	54.68	66.92	26.49
5:00:00	7.69	11.03	6.38	7.19	9.90	20.16	36.32	49.39	66.38	26.07
6:00:00	10.06	10.29	6.96	8.42	9.52	20.47	41.65	48.37	61.32	26.11
7:00:00	11.50	10.10	5.27	8.48	13.72	27.60	66.48	66.06	70.04	33.77
8:00:00	11.88	11.20	6.80	7.19	13.43	22.11	75.33	79.09	79.35	37.38
9:00:00	10.88	12.24	7.20	6.86	10.98	15.20	38.56	58.59	70.66	27.95
10:00:00	8.88	12.74	14.63	8.13	9.03	10.41	22.15	37.82	46.35	20.43
11:00:00	7.69	13.13	14.61	6.94	7.99	9.30	14.10	20.63	28.40	14.53
12:00:00	10.38	13.42	11.34	11.56	7.23	8.48	12.07	13.94	20.25	12.37
13:00:00	9.69	8.90	9.22	11.58	6.79	7.11	11.09	11.43	12.66	9.90
14:00:00	9.13	5.91	8.48	10.07	6.19	6.12	10.98	9.81	8.85	8.36
15:00:00	9.06	6.67	8.17	7.67	5.81	4.87	8.53	6.11	6.74	6.90
16:00:00	5.06	4.96	7.38	6.98	5.19	4.03	6.73	6.10	8.50	6.27
17:00:00	4.81	4.89	6.08	7.46	4.88	5.11	6.47	4.88	7.49	5.90
18:00:00	5.56	3.81	5.55	6.56	4.06	4.52	11.03	10.08	11.16	7.16
19:00:00	4.88	4.87	6.25	6.41	5.30	6.51	20.71	20.19	27.23	12.35
20:00:00	4.00	6.34	4.97	5.43	8.02	7.72	21.19	23.18	37.26	14.47
21:00:00	5.06	6.66	6.53	5.91	11.65	9.54	22.59	26.96	37.94	16.18
22:00:00	13.44	11.15	6.25	4.71	9.34	11.50	25.24	33.45	45.57	18.77
23:00:00	16.88	12.96	6.98	5.09	7.95	13.35	30.03	39.28	51.79	21.37
Promedio.Mes	9.00	9.71	7.44	6.95	8.24	11.99	27.53	34.60	41.92	18.53

Fuente: Estación de monitoreo Airlink Davis instalada en Poniente.

En cuanto al comportamiento horario, se detectan los valores más altos en la madrugada entre las 3:00 a las 9:00, y las más bajas de las 14:00 a las 18:00 (Tabla 9).

Durante el periodo muestreado se registraron valores máximos (alto PM₁₀) (Figura 31) que alcanzaban regularmente los 432 µg/m³. También se identifican 3 picos que superaron los 800 µg/m³, y una en particular que alcanzó los 1,615 µg/m³ el 19 de noviembre entre las 7 y las 8 am, fuera de los valores típicos.

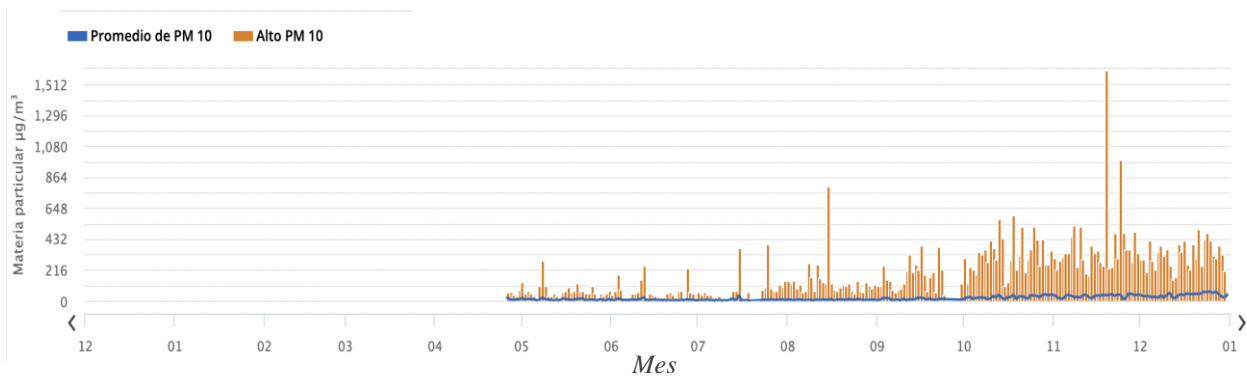


Figura 31 Máximas y promedios de PM₁₀. En la gráfica representa con barras naranjas los máximos de PM₁₀ y la línea azul el promedio. Fuente: elaboración propia con datos de la estación de monitoreo Airlink Davis instalada en Norponiente.

En cuanto al comportamiento con las PM_{2.5} (Figura 32) los valores máximos superaron en varias ocasiones los 320 µg/m³ y con picos fuera de lo normal en varias ocasiones a finales de noviembre y diciembre.

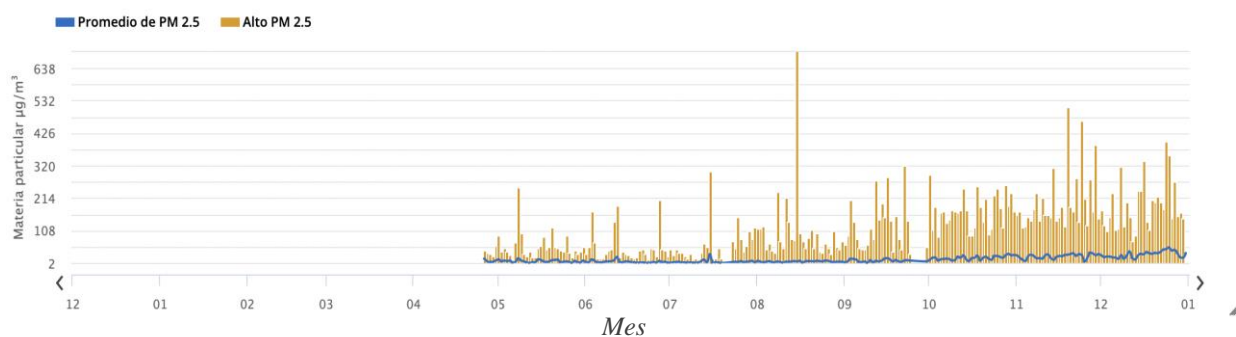


Figura 32 Estación Norponiente. Máximas y promedios de PM_{2.5}. En la gráfica representa con barras naranjas los máximos de PM_{2.5} y la línea azul el promedio. Fuente: elaboración propia con datos de la estación de monitoreo Airlink Davis instalada en Norponiente.

Los valores de PM₁ (Figura 33) coincide con el comportamiento de PM_{2.5} y PM₁₀ durante el mismo periodo, con máximos de 276 µg/m³ a mediados de agosto, y repitiendo un patrón con valores altos a finales de septiembre e inicios de octubre, así como a finales de noviembre y diciembre.

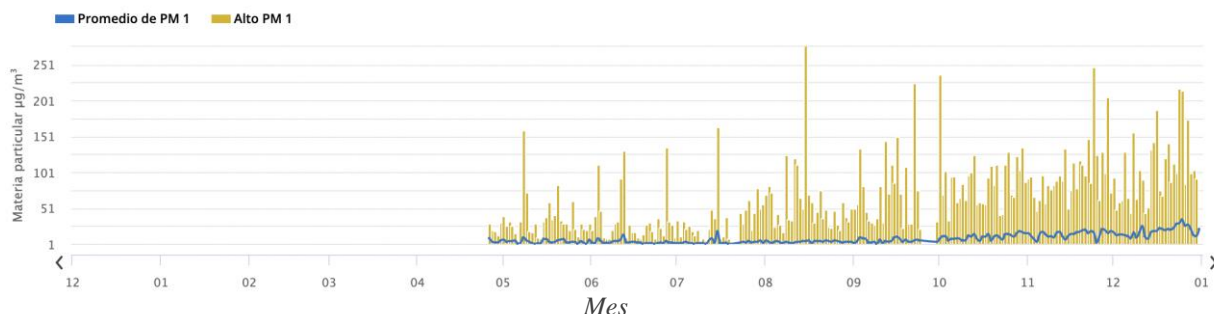


Figura 33 Estación Norponiente. Máximas y promedios de PM₁. En la gráfica representa con barras naranjas los máximos de PM₁ y la línea azul el promedio. Fuente: elaboración propia con datos de la estación de monitoreo Airlink Davis instalada en Norponiente.

En resumen (Tabla 18), los datos de los sensores instalados en la zona **Poniente** registro en promedio 12.52 µg/m³ para PM₁₀, 8.83 µg/m³ para PM_{2.5} y 5.75 µg/m³ para PM₁. Los datos de la estación **Norponiente** muestran un promedio de 18.53 µg/m³ para PM₁₀, 13.48 µg/m³ para PM_{2.5} superando en máximo permisible anual de 10 µg/m³ para PM_{2.5}, y por último 8.25 µg/m³ para PM₁.

Tabla 10 Resumen de los promedios mensuales PM₁₀, PM_{2.5} y PM₁.

Mes	Poniente. PM ₁₀	Poniente. PM _{2.5}	Poniente. PM ₁	Nor-Pon. PM ₁₀	Nor-Pon. PM _{2.5}	Nor-pon. PM ₁
Octubre	11.53	7.96	5.02	N/D	N/D	N/D
Noviembre	12.97	9.10	5.82	N/D	N/D	N/D
Diciembre	20.98	15.91	10.44	N/D	N/D	N/D
Enero	21.81	16.19	10.41	N/D	N/D	N/D
Febrero	12.45	8.35	5.17	N/D	N/D	N/D
Marzo	11.72	7.58	4.61	N/D	N/D	N/D
Abril	11.20	7.14	4.32	9.00	7.06	4.00
Mayo	9.70	5.98	3.56	9.71	7.69	4.50
Junio	7.60	4.95	3.03	7.44	6.08	3.68
Julio	5.15	3.71	2.34	6.95	5.82	3.63
Agosto	5.04	3.92	2.56	8.24	6.60	4.19
Septiembre	10.10	6.85	4.79	11.99	9.25	5.60
Octubre	15.01	11.80	9.16	27.53	18.73	11.04
Noviembre	12.55	8.54	5.32	34.60	23.77	14.59
Diciembre	19.33	13.70	9.06	41.92	30.04	18.88
Promedio	12.52	8.83	5.75	18.53	13.48	8.25

Fuente: Estación de monitoreo Airlink Davis instalada en Poniente y Norponiente

Para PM_{10} diciembre (Tabla 10) de la estación **Norponiente** superó el máximo permisible de 24 horas de $36 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Al suavizar los picos anómalos que se presentaron en la estación **poniente**, y limpiar la base de datos, el resto de los valores se encuentra dentro de los límites permisibles para PM_{10} y $PM_{2.5}$.

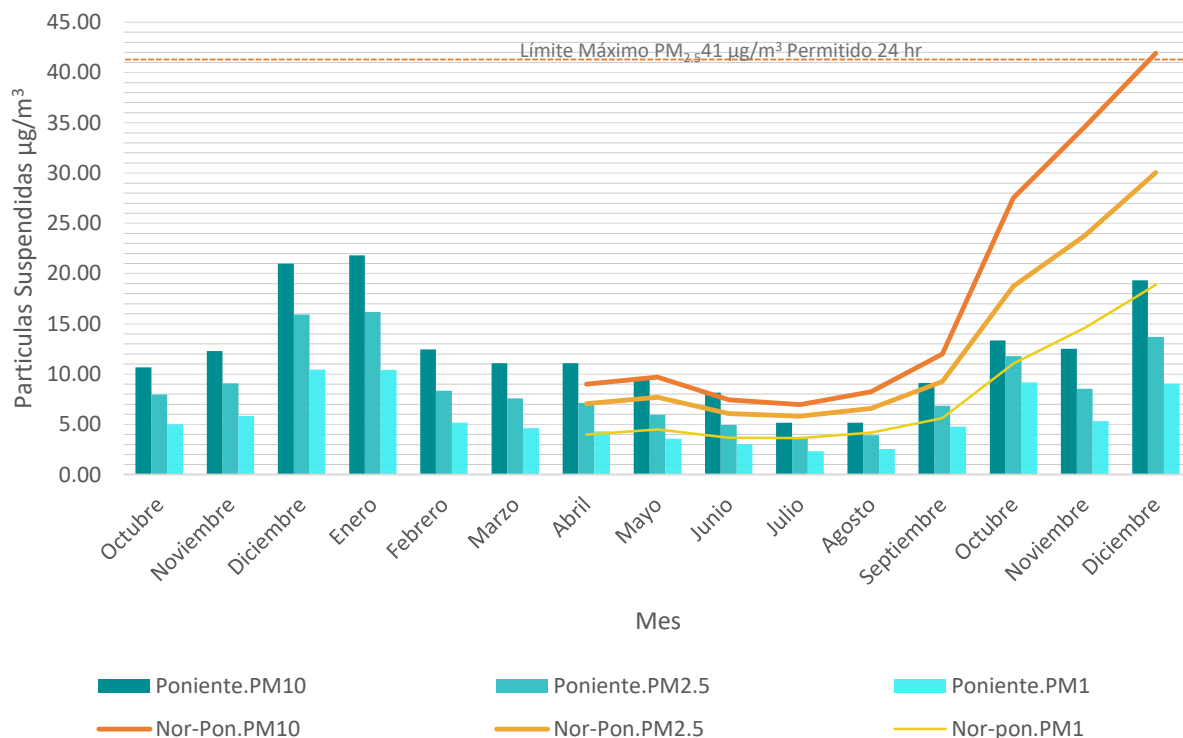


Figura 34 Promedios mensuales de la estación Poniente y Norponiente. La gráfica muestra el comportamiento del particulado ambiental, donde las barras azules de oscuro a claro representan los valores promedio de PM_{10} , $PM_{2.5}$ y PM_1 de la estación Poniente. Las líneas naranjas de oscuro a claro representan los valores promedio de PM_{10} , $PM_{2.5}$ y PM_1 para la estación Norponiente. Fuente: elaboración propia con datos de la estación de monitoreo Airlink Davis instalada en Poniente y Norponiente.

Durante los meses húmedos del verano (Figura 34) se registran los valores de PM más bajos en el año, mientras que los valores más altos se presentan en los meses fríos de diciembre y enero. Los meses secos presentan valores promedios.

También se observa que los valores de la estación norponiente son más altos durante el año que en la estación poniente (Figura 37). Incluso visualmente podemos observar la gran carga de particulado atmosférico que ocurren durante el invierno al poniente de la ciudad (Figura 35).



Figura 35 Panorámica de dron sobre zona de estudio, vista de poniente a oriente.

3. Crecimiento Urbano

En los últimos 20 años la ciudad ha crecido en varias dimensiones, territorialmente casi duplica la huella urbana 1.97 veces, 2.57 veces el número de vivienda, y 2.19 veces su población al 2018 con respecto a 1990, con cifras extraídas de los censos de población y vivienda de INEGI (Figura 36).

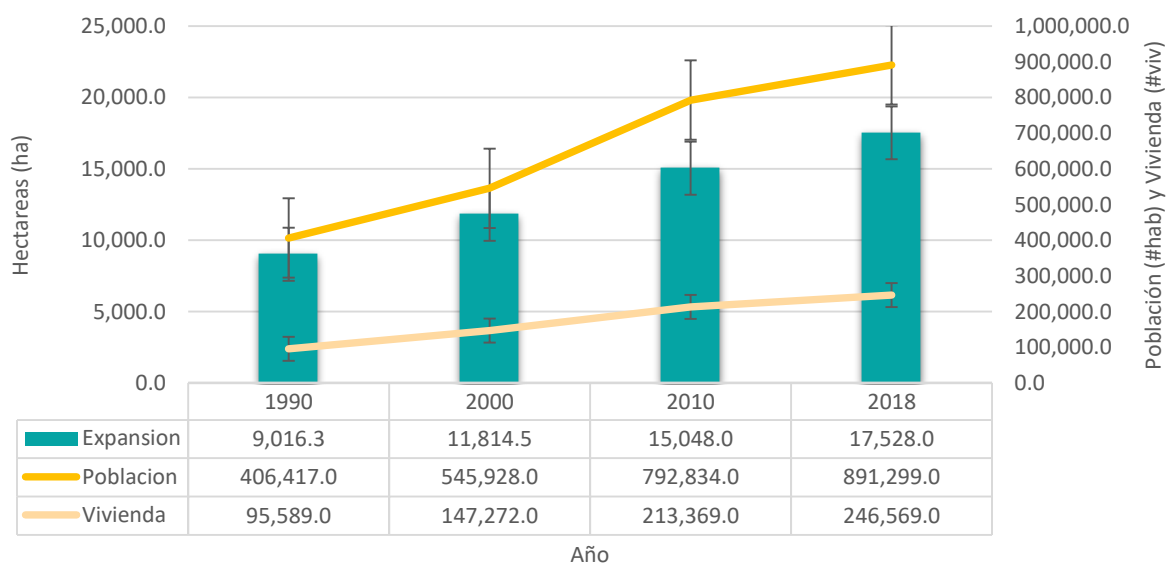


Figura 36 Crecimiento de la Ciudad 1990-2018. Las barras representan el crecimiento en hectáreas y su nomenclatura se encuentra del lado izquierdo. Las líneas amarillas representan a la población y la vivienda en los años correspondientes. Fuente: elaboración propia con datos de INEGI, Censo de Población y Vivienda 1990,2000,2010, 2018.

El crecimiento de la ciudad en la dimensión territorial se dirige al norte, al poniente y al sur, su expansión en oriente se vio condicionada por los linderos naturales; cerro el Bachoco, la presa Abelardo L. Rodríguez, parte del cauce del Rio Sonora y otras escorrentías (Figura 37).

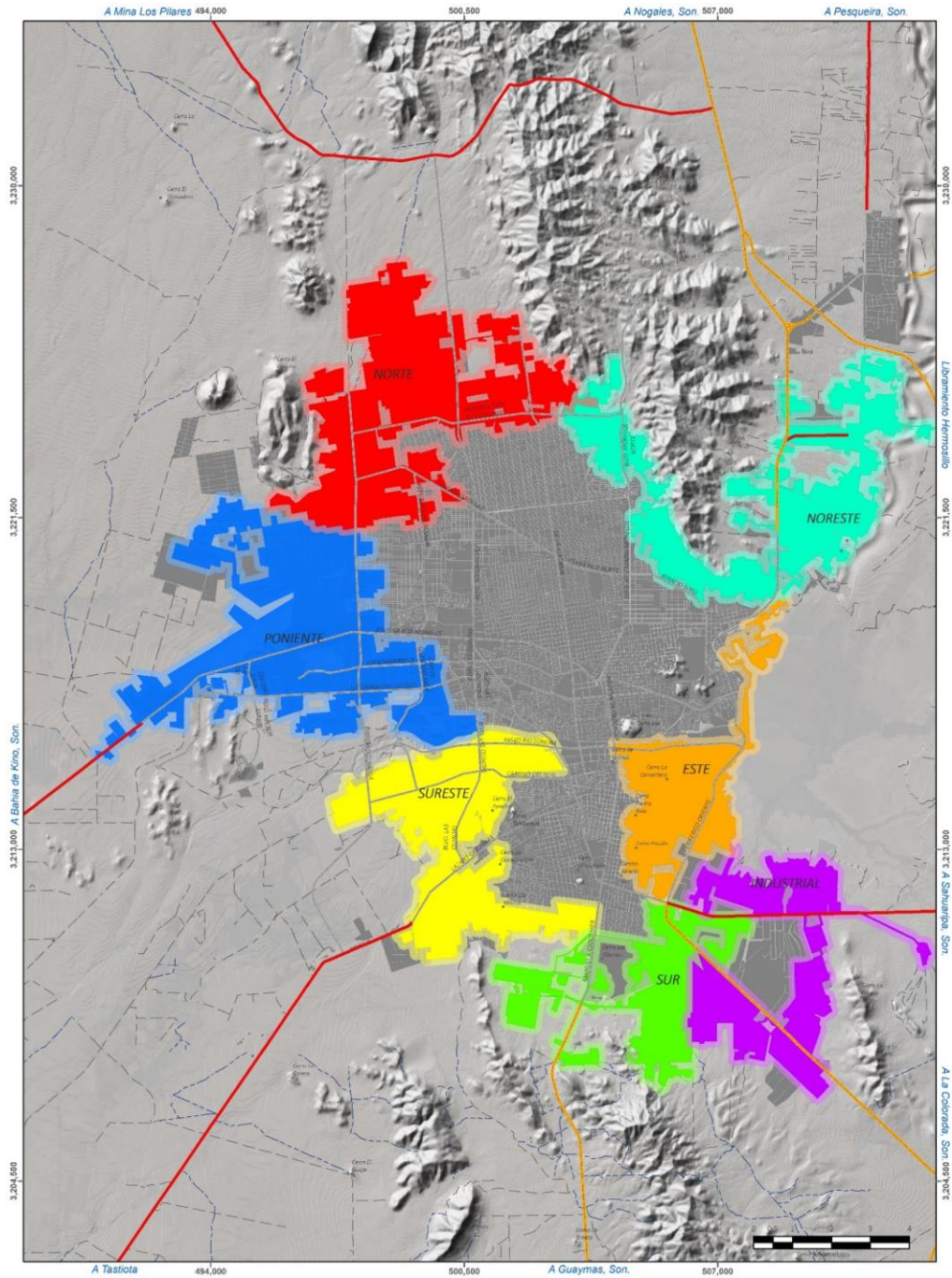


Figura 37 Zonas de crecimiento por periodo, 1990-2018. Se dividió el área de crecimiento de la ciudad, entre los límites de 1990 y los límites para el 2018. Donde el rojo representa la zona Norte, naranja el Este, amarillo el Suroeste, verde el Sur, morado es Industrial, azul es la Poniente y el cian la Noreste. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11 Zonas de crecimiento durante el periodo 1990-2018.

<i>Zona</i>	<i>Superficie (ha)</i>	<i>Porcentaje</i>
<i>Norte</i>	2,032.00	21.18%
<i>Noreste</i>	1,563.26	16.30%
<i>Este</i>	898.82	9.37%
<i>Industrial</i>	870.66	9.08%
<i>Sur</i>	797.18	8.31%
<i>Suroeste</i>	1,553.29	16.19%
<i>Poniente</i>	1,877.09	19.57%
<i>Total</i>	9,592.30	100.00%

Fuente: Registro de imágenes satelitales y sistemas de información geográfica.

Se identifican 7 zonas de expansión del área urbana (Tabla 11 y Figura 37); Norte, Noreste, Este, Industrial, Sur, Suroeste y Poniente, siendo la zona Norte y poniente las que se consideran de mayor crecimiento del área urbana y al mismo tiempo es el área que identifica como vulnerable en el trabajo de Ortega Rosas, et al (2020) (Figura 10).

Para el periodo del 2016 – 2021 la ciudad de Hermosillo registró un aumento de 1,391.54 ha de crecimiento urbano, es decir, aumento un 8% su área urbana. En cuanto a la población del 2016 al 2021 presentó 140,636 habitantes más, que corresponde a un aumento del 16%. Estos valores se pueden relacionar anualmente con la densidad, donde se ve un aumento de 43.94 hab/ha. a 48.43 hab/ha (Figura 38). Eso quiere decir que actualmente hay más personas viviendo en el mismo espacio.

La tendencia del crecimiento urbano y densidad poblacional de Hermosillo van en aumento (Figura 38). Se puede observar también un ajuste, de parte de la fuente de información, entre el 2018 y el 2019.

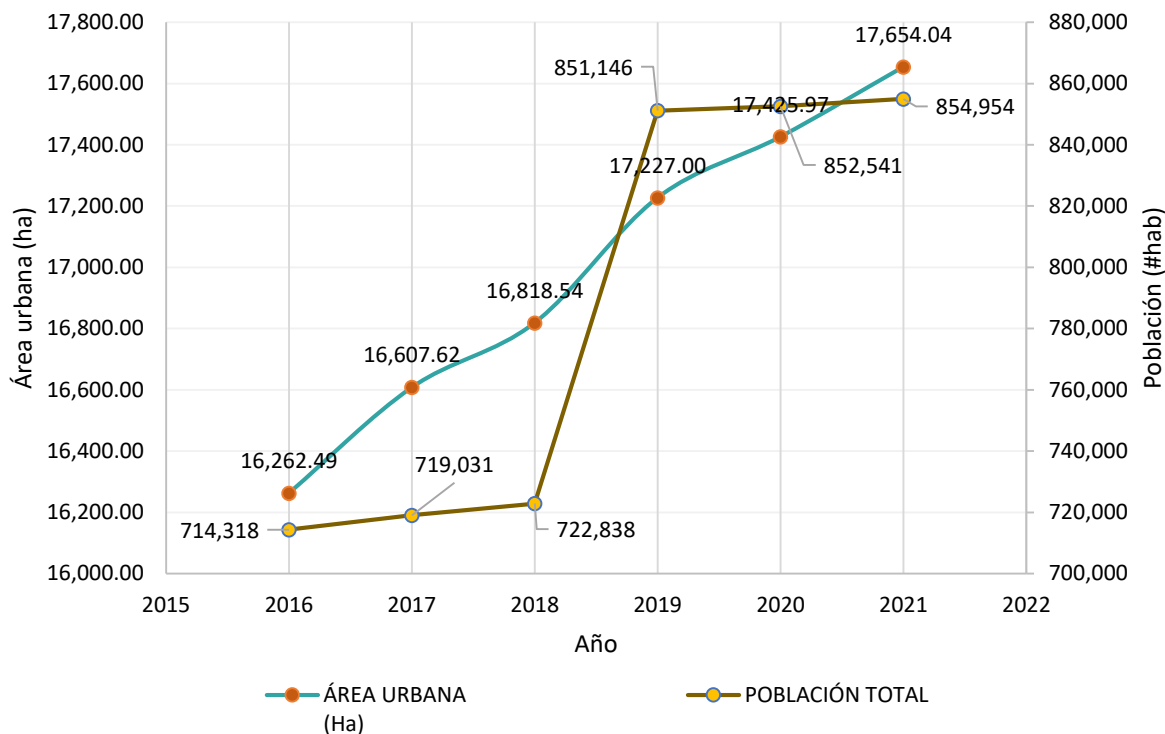


Figura 38 Crecimiento poblacional y urbano de la ciudad de Hermosillo en el periodo 2016 – 2021. La línea azul representa el crecimiento del área urbana y la línea oscura representa el crecimiento de la población. Fuente: elaboración propia con datos del CENSO de población y vivienda de INEGI 2010 y 2020, resultados por AGEB y manzana urbana.

El crecimiento urbano que experimentó la ciudad en el periodo 2016-2021 representado en el mapa (Figura 38 y 39) nos indica que hasta el 2016 el área urbana consolidada era de 16,262.49 ha (señalado con color verde). Para el año del 2017 la ciudad creció 345 ha (color verde claro), el grueso del crecimiento en este año se concentró en el poniente de la ciudad. Para el año 2018 creció 211 ha (representado de color amarillo), cuyo crecimiento se presentó al poniente, seguido del norte. Para el 2019 alcanzó un aumento de 408 ha, el más abundante del periodo (color naranja), y en el mapa se puede ver distribuida en mayor grado al poniente, seguido del norte, suroeste, sur y otro tanto en el resto de la ciudad. En el año 2020 creció 199 ha en casi todas las zonas, con mayor presencia en el poniente y norte (color rojo). En el 2021 presentó un crecimiento en 228 ha (color rojo oscuro), se observa en el mapa su distribución en todas las zonas, con un intenso crecimiento en desarrollos entre la zona poniente y norte.

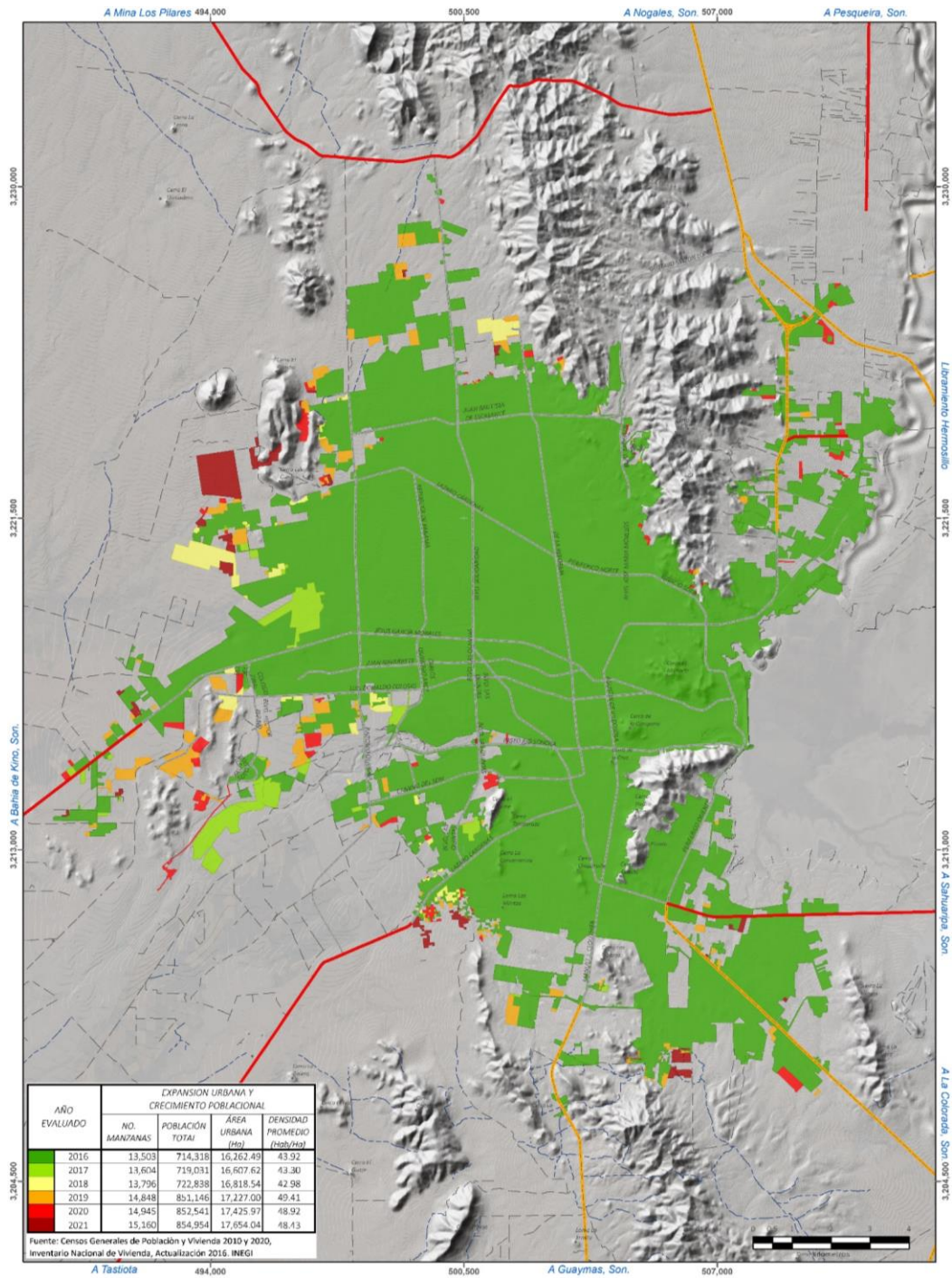


Figura 39 Mapa del crecimiento urbano del periodo 2016 - 2021 de la ciudad de Hermosillo. El mapa muestra en color verde el área urbana en 2016, en verde claro el crecimiento sucedido en el 2017, amarillo para el 2018, naranja hasta el 2019, rojo para el 2020 y rojo oscuro en 2021. Fuente: Elaboración propia con base en mapeo.

Para correlacionar las variables de crecimiento urbano con el resto de variables se tomaron muestras de 11 polígonos en la zona poniente (Figura 41) extrayendo el área de crecimiento en hectáreas registrado en cada año para cada muestra específica.

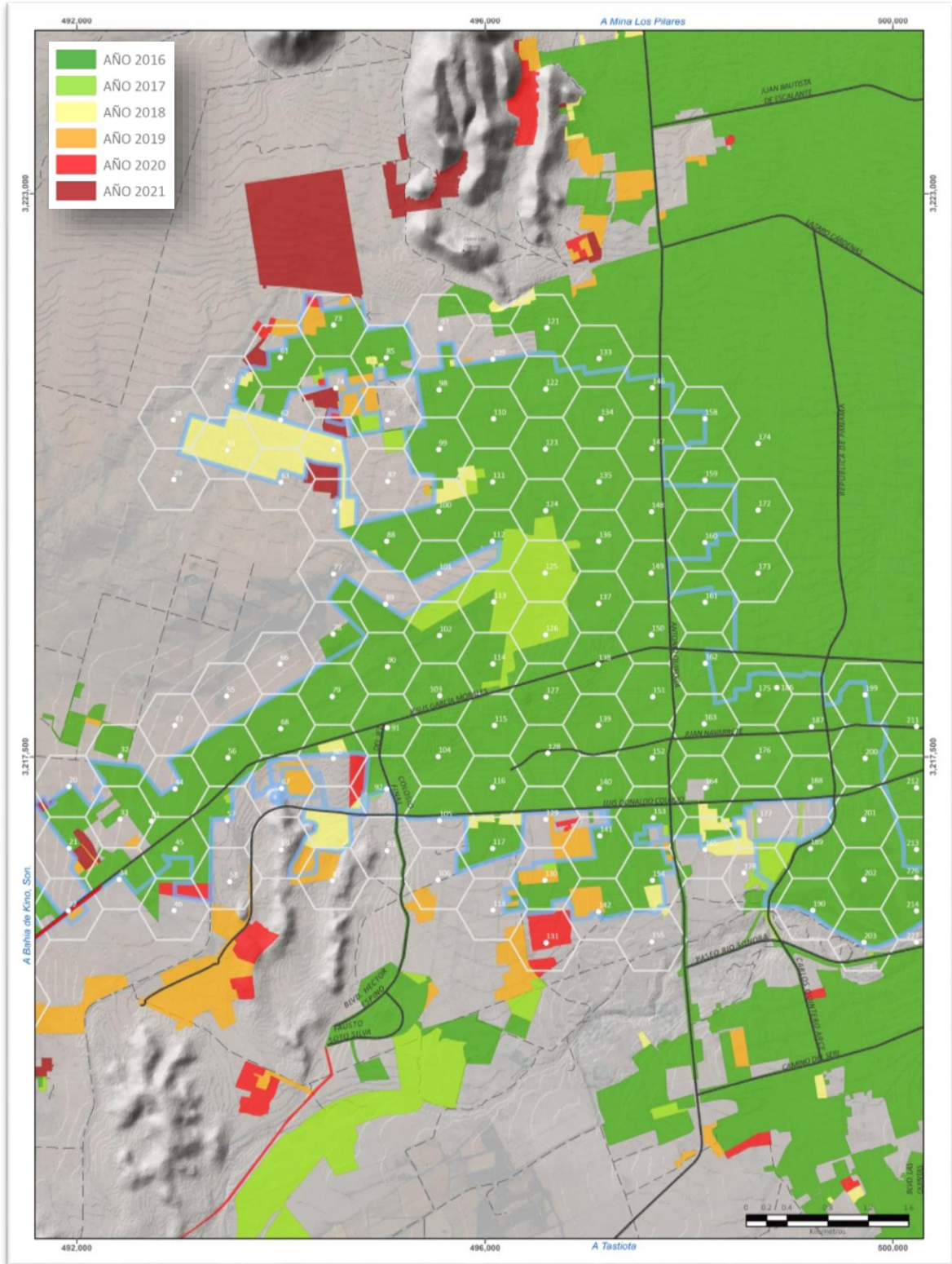


Figura 40 Crecimiento Urbano. Mapa que refleja la expansión urbana durante el periodo 2016 – 2022.

En la parte superior izquierda se encuentra la leyenda, donde el color verde representa el crecimiento hasta el año 2016, verde claro el crecimiento hasta el 2017, de color amarillo hasta el año 2018, de color naranja hasta el año 2019, de color rojo hasta el año 2020 y con color rojo oscuro el crecimiento hasta el año 2021. Los polígonos blancos reflejan la matriz de hexágonos de las muestras.

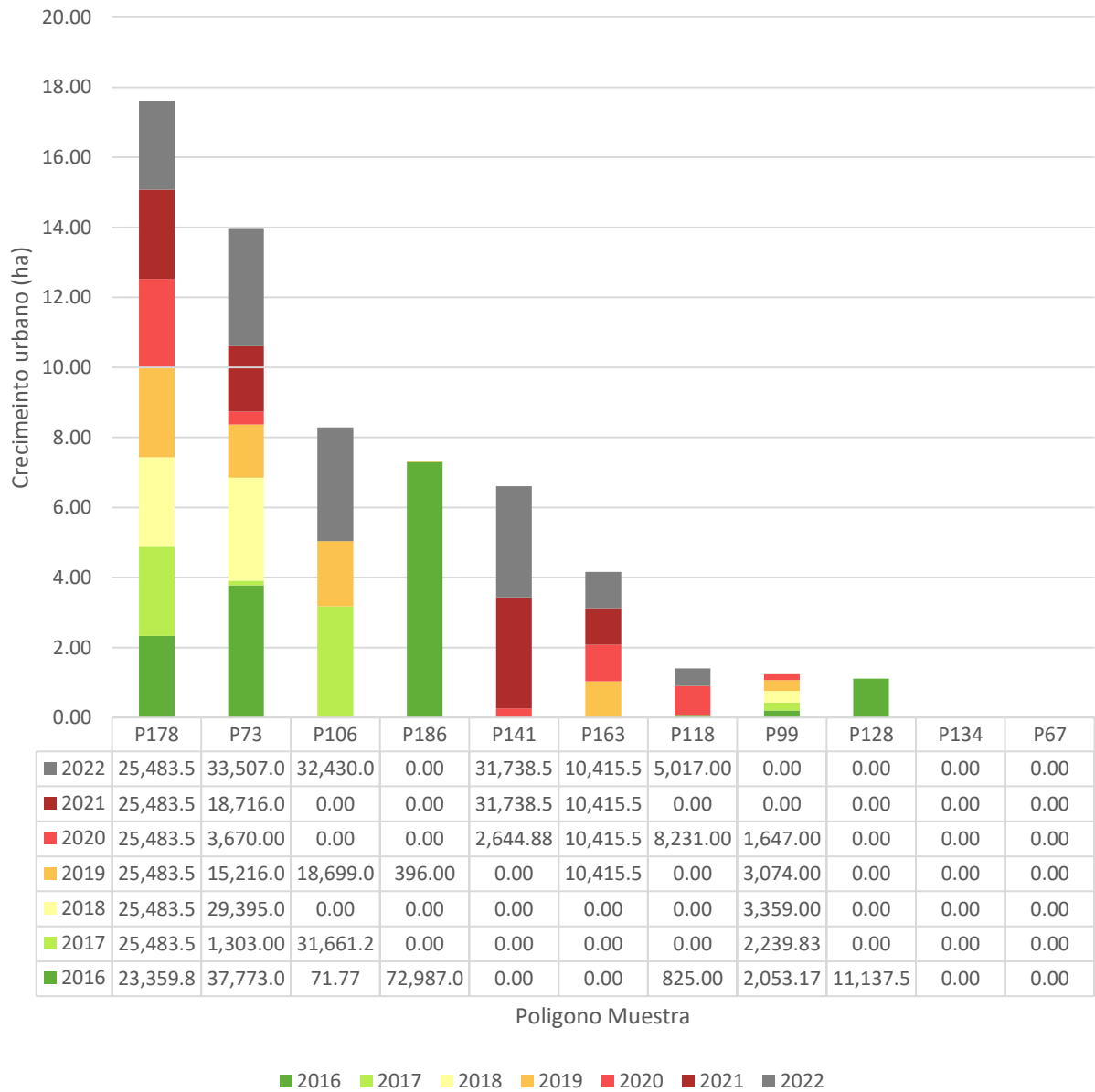


Figura 41 Crecimiento urbano anual por polígono muestra durante el periodo 2016 – 2022. El grafico muestra en color verde el área urbana en 2016, en verde claro el crecimiento sucedido en el 2017, amarillo para el 2018, naranja hasta el 2019, rojo para el 2020 y rojo oscuro en 2021. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 40 y 41 se puede observar el crecimiento anual que presentaron los polígonos muestreados, donde el polígono 178 tuvo un crecimiento constante durante el periodo, seguido del 73 que también ha manifestado crecimiento todos los años. El siguiente en orden de expansión ha sido el 106 que presentó su mayor crecimiento en el 2022. El 186 finalizó el 2016 con su mayor y único crecimiento. El 141 presentó su mayor crecimiento en 2021 y 2022. El 163 creció solo los últimos 4 años. El 118 tuvo algunos años de crecimiento mínimo, al igual que el 99. El 128 creció únicamente en el año 2016, después se mantuvo constante. Los polígonos 134 y 67 no presentaron crecimiento en el periodo de estudio (Figura 41).

4. Cobertura Arbórea

Los resultados del comportamiento de cobertura arbórea correspondiente al periodo del 2016 al 2022 en el poniente de la ciudad, se obtuvieron a partir de las 11 muestras, cada muestra con una superficie de 31.18 ha (que representa el en el análisis el 100% del polígono).

La cobertura arbórea final (Figura 42) es representada en la gráfica en hectáreas, observando que la muestra del polígono 186 tiene los valores más altos 10.17% de cobertura arbórea (Figura 44), seguida del 163 con 8.37% y el 99 con 6.8%.

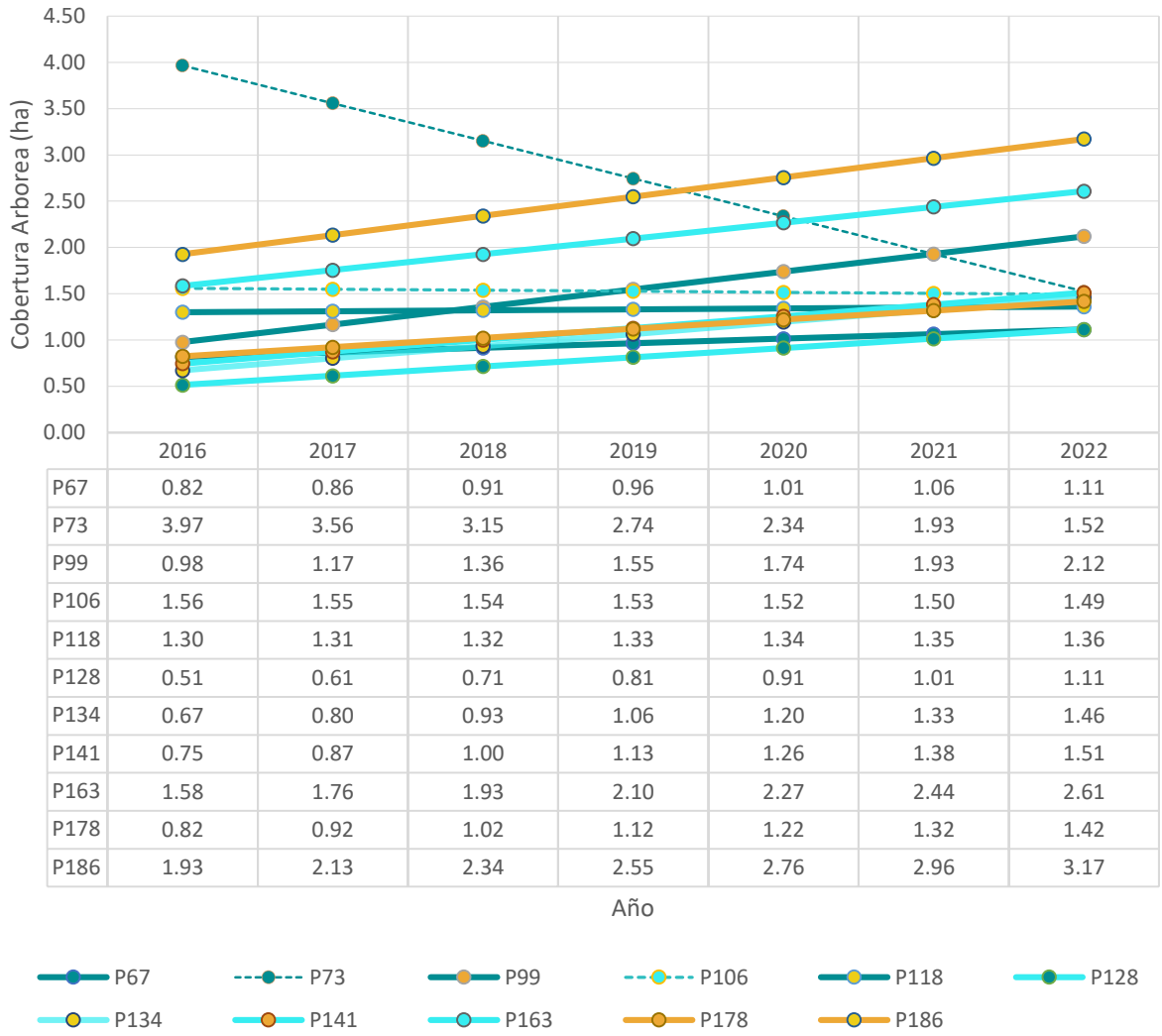


Figura 42 Comportamiento de la cobertura arborea anual por muestra 2016-2022. El gráfico muestra en colores cian oscuro los polígonos del 67 al 118, pudiendo diferenciarlos por color del marcador en la simbología, en cian claro los polígonos del 128 al 163, diferenciándolos por el color del marcador, y el 178 y 186 de color naranja. Las líneas punteadas representan a los polígonos cuya área disminuyó.

El comportamiento de la cobertura por polígono muestreado en los diferentes años del 2016 al 2022 (Figura 42) nos muestra un crecimiento de cobertura arborea en la mayoría de las muestras de entre 0.23% hasta 5.63%. También se observan 2 polígonos cuya cobertura arborea se redujo en el periodo, el más notorio es la muestra 73 que se redujo 9.03% y la otra es la muestra 106 con 0.24%, se representan en línea punteada en la figura (Figura 42). Por otro lado, se observa que las zonas que tuvieron mayor incremento de la cobertura arborea se encuentran dentro de la mancha urbana en zonas ya consolidadas (Figura 43 y 45).

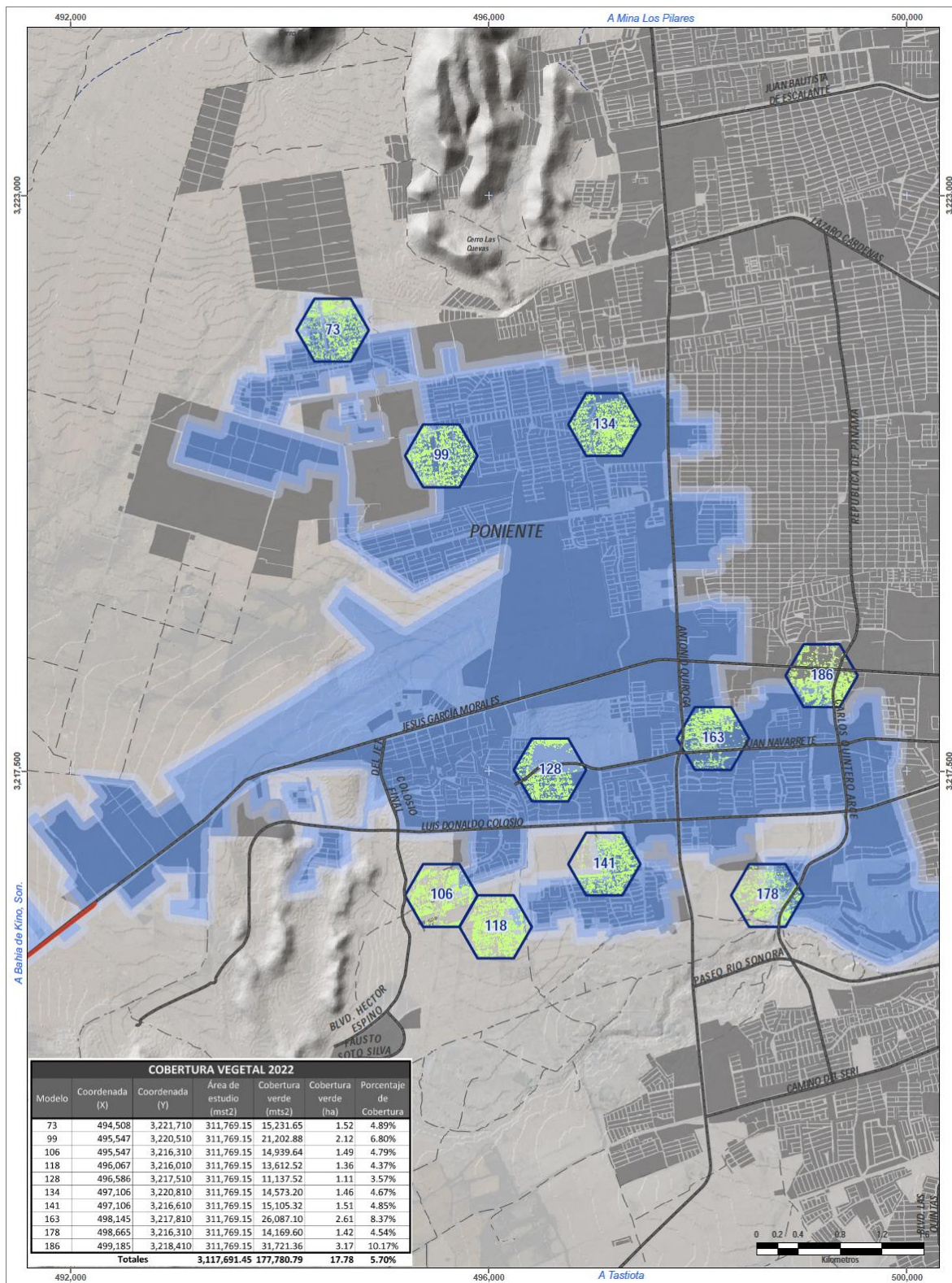


Figura 43 Mapa de ubicación de las muestras de cobertura arbórea.

Fuente: Elaboración propia.

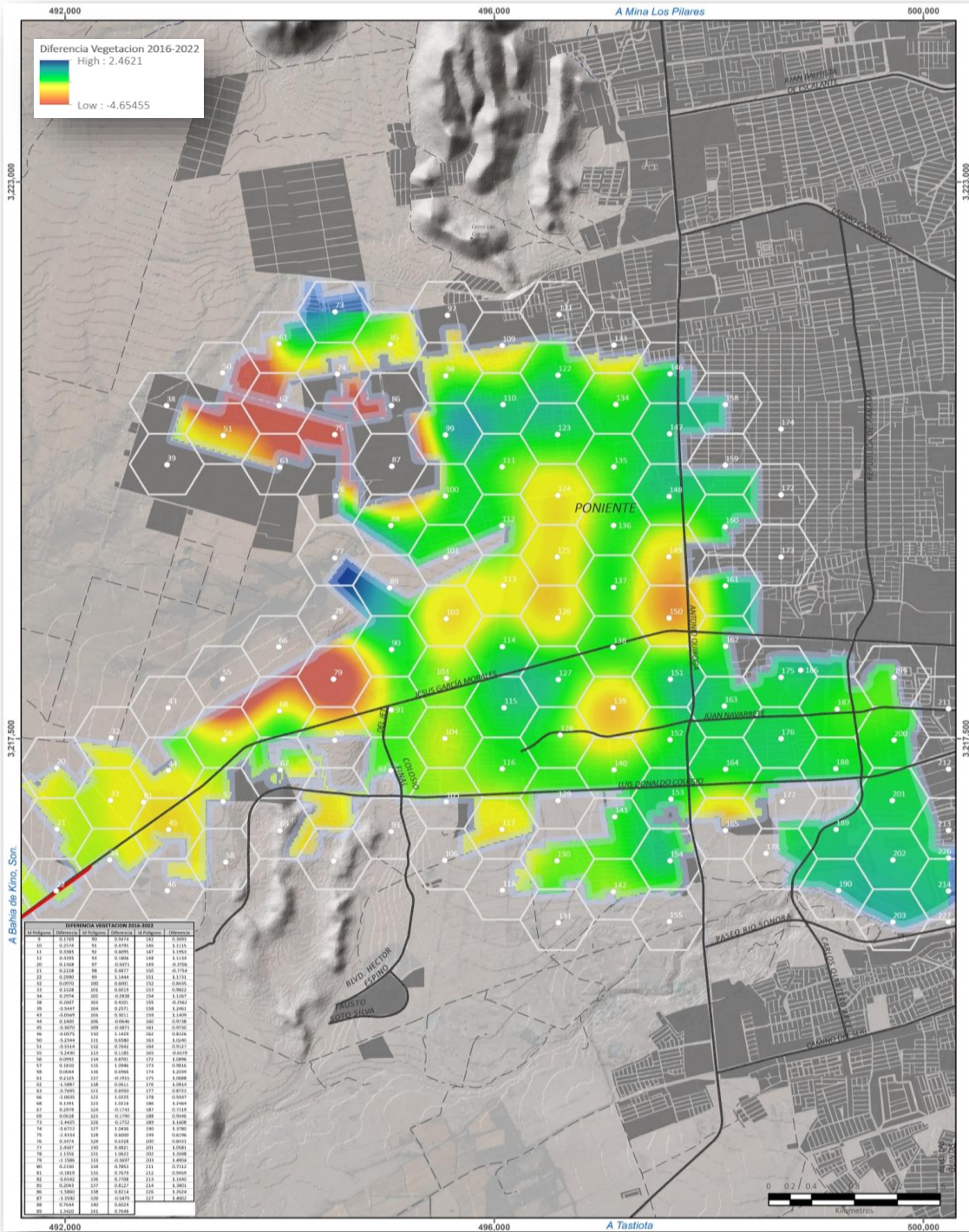


Figura 45 El mapa representa la diferencia de cobertura arbórea en el periodo 2016-2022. Donde los tonos amarillos a rojos representan una diferencia negativa, y los tonos de verdes a azules representan valores positivos. Fuente: Elaboración propia.

Los sectores cercanos a los límites de la mancha urbana (oeste) presentan menores valores de cobertura arbórea entre las muestras, que conforme se acerca al centro de la ciudad (este), los valores aumentan (Figura 48).

5. Análisis estadísticos

Se encontró que la cobertura urbana y la cobertura de vegetación tienen un efecto sobre la concentración de partículas suspendidas (análisis de varianza del modelo de regresión lineal múltiple, $F_{901}^{22} = 24.05$, $P < 0.001$), aunque ese efecto depende de la ubicación (Tabla 12, Figura 45, 46 y 47). De igual forma, se encontró que la cobertura urbana y la cobertura de vegetación tienen un efecto significativo en la temperatura media diaria (análisis de varianza del modelo de regresión lineal múltiple, $F_{901}^{22} = 600.10$, $P < 0.001$), y esos efectos también dependen de la ubicación (Tabla 13, Figuras 48 y 49). El efecto la estacionalidad (factor *MES*) sobre PM_{10} (Tabla 12) y T_{media} (Tabla 13) fue también evidente.

Tabla 12 Coeficientes de un modelo de regresión lineal múltiple de partículas PM₁₀.

Variable	$\hat{\beta}$	E.E. ($\hat{\beta}$)	<i>t</i>	<i>P</i>
(Intersección)	1.958	0.237	8.250	<0.001
logit(urbano)	-0.171	0.033	-5.142	<0.001
logit(vegetación)	-0.556	0.062	-8.913	<0.001
<i>lon</i>	-1.458	0.313	-4.659	<0.001
<i>lat</i>	0.451	0.244	1.847	0.065
<i>lon x lat</i>	-0.382	0.092	-4.147	<0.001
<i>lon</i> ²	-0.177	0.047	-3.795	<0.001
<i>lat</i> ²	-0.315	0.054	-5.855	<0.001
logit(urbano) x lon	0.312	0.036	8.600	<0.001
logit(vegetación) x lon	-0.533	0.099	-5.379	<0.001
logit(urbano) x lat	0.169	0.022	7.728	<0.001
logit(vegetación) x lat	0.011	0.080	0.139	0.890
<i>MES</i> [enero]	0.197	0.081	2.418	0.016
<i>MES</i> [febrero]	0.049	0.081	0.600	0.549
<i>MES</i> [marzo]	-0.036	0.081	-0.436	0.663
<i>MES</i> [mayo]	0.001	0.081	0.006	0.995
<i>MES</i> [junio]	-0.121	0.081	-1.488	0.137
<i>MES</i> [julio]	-0.516	0.081	-6.340	<0.001
<i>MES</i> [agosto]	-0.661	0.081	-8.120	<0.001
<i>MES</i> [septiembre]	-0.419	0.081	-5.149	<0.001
<i>MES</i> [octubre]	0.008	0.081	0.099	0.922
<i>MES</i> [noviembre]	0.082	0.081	1.006	0.315
<i>MES</i> [diciembre]	0.352	0.082	4.320	<0.001

Sobre la concentración de partículas suspendidas <10 µm (log(PM10)) en Hermosillo, Sonora, con variables explicatorias proporción de cobertura urbana (urbano), proporción de cobertura de vegetación (vegetación), longitud (lon), latitud (lat), y factor MES (con niveles enero, ... , diciembre). Los símbolos $\hat{\beta}$ y E.E. ($\hat{\beta}$) denotan estimador y error estándar, respectivamente.

El efecto de la cobertura arbórea sobre las concentraciones de PM_{10} presenta una variación dependiente de la estación y de la ubicación (Tabla 12). En los meses de invierno la correlación es significativa y positiva, mientras que en los meses de verano la correlación es significativa y negativa. De acuerdo a la ubicación (longitud y latitud) observamos que *al aumentar la cobertura arbórea se registra un incremento de PM_{10} hacia el extremo oeste de la zona poniente* (Figuras 46, superior) y una disminución de PM_{10} hacia el extremo este de la zona poniente. Mientras que hacia el extremo norte y sur de la zona poniente (Figura 47, superior) se observó que al incrementar la cobertura arbórea la concentración de PM_{10} tiende a disminuir.

El efecto de la cobertura urbana sobre las concentraciones de PM_{10} presenta de igual forma una variación dependiente de la estación y de la ubicación (Tabla 12). De acuerdo a la ubicación (longitud y latitud) observamos que al aumentar la cobertura urbana se registra un decremento de PM_{10} hacia el extremo oeste de la zona poniente (Figuras 46, inferior) y un aumento de PM_{10} hacia el extremo este. Mientras que hacia el extremo norte se observa poca influencia de la cobertura urbana con respecto a la concentración de PM_{10} mostrando un ligero aumento (Figura 47, inferior) y una tendencia a la disminución en la concentración de PM_{10} hacia el extremo sur.

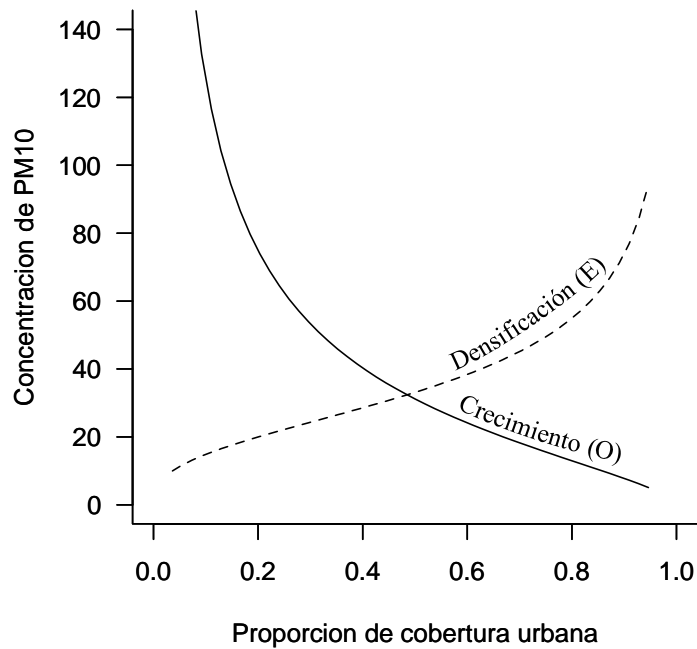
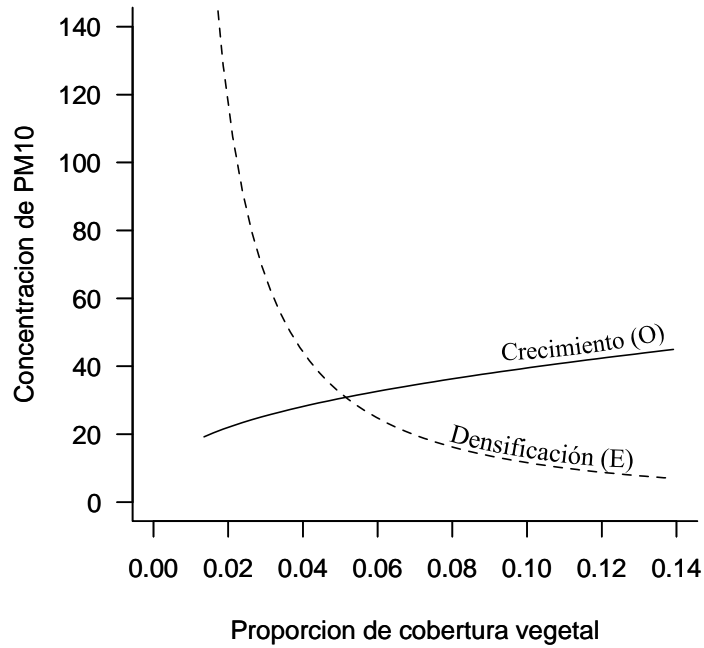


Figura 46 Efectos de la cobertura vegetal (gráfica superior) y la cobertura urbana (gráfica inferior) sobre PM₁₀ para el mes de enero (este y oeste). Según el modelo de regresión múltiple (Tabla 12). La línea continua y la línea punteada son las relaciones para el extremo oeste (111.0617°W) y este (111.0117°W) respectivamente, del área de estudio.

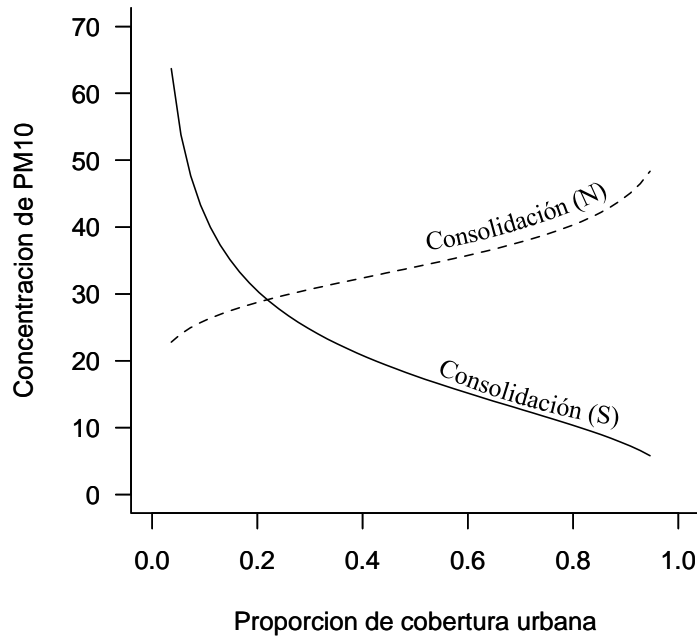
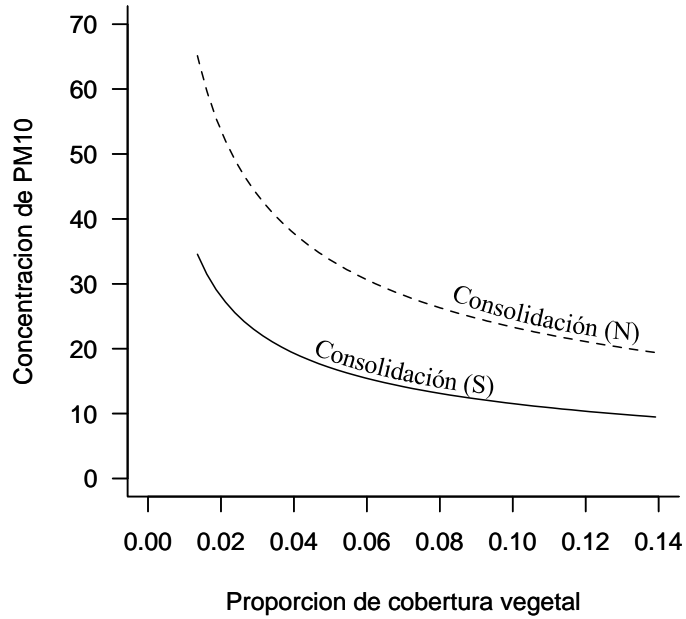


Figura 47 Efectos de la cobertura vegetal (gráfica superior) y la cobertura urbana (gráfica inferior) sobre PM₁₀ para el mes de enero (sur y norte). Según el modelo de regresión múltiple (Tabla 12). La línea continua y la línea punteada son las relaciones para el extremo sur (29.0724°N) y norte (29.1239°N) respectivamente, del área de estudio

En relación al efecto de la cobertura arbórea sobre la temperatura media diaria detectamos una correlación significativa y negativa, siendo más evidente esa relación en los meses de invierno (Tabla 13). Este efecto varía con la ubicación (longitud y latitud), tomando como base el mes de enero (Figura 48, superior) observamos que para el extremo oeste se da un ligero incremento en las temperaturas al aumentar la cobertura vegetal, pero es mucho más notorio el efecto de disminución de temperaturas diarias promedio al aumentar la cobertura vegetal para el extremo este. Mientras que para los extremos norte y sur se observa el mismo efecto (Figura 49, superior) de disminución de las temperaturas promedio diarias al aumentar la cobertura vegetal.

El efecto de la cobertura urbana sobre la temperatura media diaria se registra de igual forma una variación dependiente de la ubicación y la estación. La correlación es significativa y negativa. Este efecto varía con la ubicación (longitud y latitud), tomando como base el mes de enero (Figura 48, inferior) observamos que para el extremo oeste al aumentar la cobertura urbana existe una disminución de las temperaturas promedio diarias, mientras que para el extremo este sucede un aumento de temperatura. En relación a los extremos norte y sur de la zona poniente (Figura 49, inferior) se detecta una disminución de la temperatura media diaria al aumentar la cobertura urbana pero mucho más marcada para el extremo sur.

Tabla 13 Coeficientes de un modelo de regresión lineal múltiple para Temperatura.

Variable	$\hat{\beta}$	E.E.($\hat{\beta}$)	t	P
(Intersección)	24.558	0.726	33.826	<0.001
logit(<i>urbano</i>)	-0.182	0.102	-1.795	0.073
logit(<i>vegetación</i>)	-0.395	0.191	-2.070	0.039
<i>lon</i>	-1.357	0.957	-1.418	0.156
<i>lat</i>	0.158	0.746	0.212	0.832
<i>lon</i> x <i>lat</i>	-0.437	0.282	-1.553	0.121
<i>lon</i> ²	-0.226	0.143	-1.581	0.114
<i>lat</i> ²	-0.295	0.165	-1.793	0.073
logit(<i>urbano</i>) x <i>lon</i>	0.327	0.111	2.943	0.003
logit(<i>vegetación</i>) x <i>lon</i>	-0.479	0.303	-1.580	0.114
logit(<i>urbano</i>) x <i>lat</i>	0.075	0.067	1.124	0.261
logit(<i>vegetación</i>) x <i>lat</i>	-0.063	0.244	-0.260	0.795
<i>MES</i> [enero]	-8.309	0.249	-33.350	<0.001
<i>MES</i> [febrero]	-6.661	0.249	-26.736	<0.001
<i>MES</i> [marzo]	-3.697	0.249	-14.842	<0.001
<i>MES</i> [mayo]	2.500	0.249	10.035	<0.001
<i>MES</i> [junio]	7.423	0.249	29.797	<0.001
<i>MES</i> [julio]	7.898	0.249	31.700	<0.001
<i>MES</i> [agosto]	6.967	0.249	27.959	<0.001
<i>MES</i> [septiembre]	5.644	0.249	22.648	<0.001
<i>MES</i> [octubre]	2.455	0.249	9.847	<0.001
<i>MES</i> [noviembre]	-3.328	0.249	-13.347	<0.001
<i>MES</i> [diciembre]	-7.889	0.249	-31.631	<0.001

Sobre la temperatura media diaria (T_{media}) en Hermosillo, Sonora, con variables explicatorias proporción de cobertura urbana (*urbano*), proporción de cobertura de vegetación (*vegetación*), longitud (*lon*), latitud (*lat*), y factor *MES* (con niveles enero, ... , diciembre). Los símbolos y $E.E.(\hat{\beta})$ denotan estimador y error estándar, respectivamente.

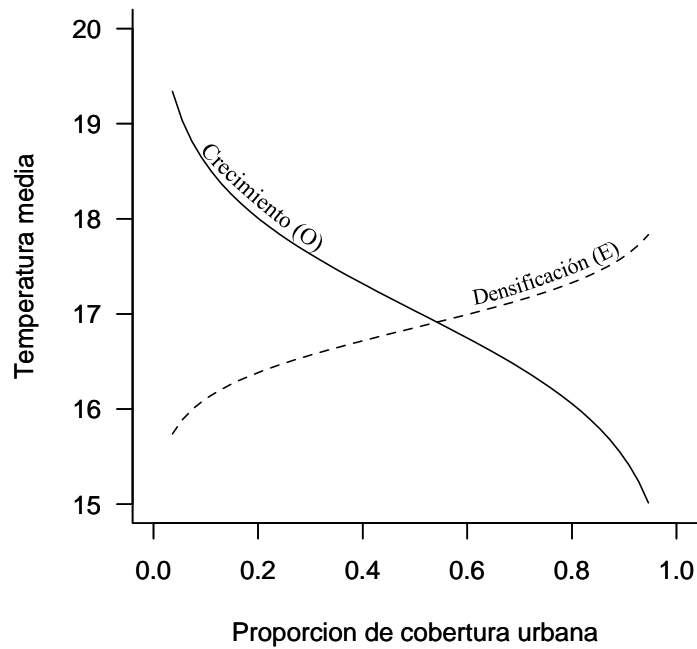
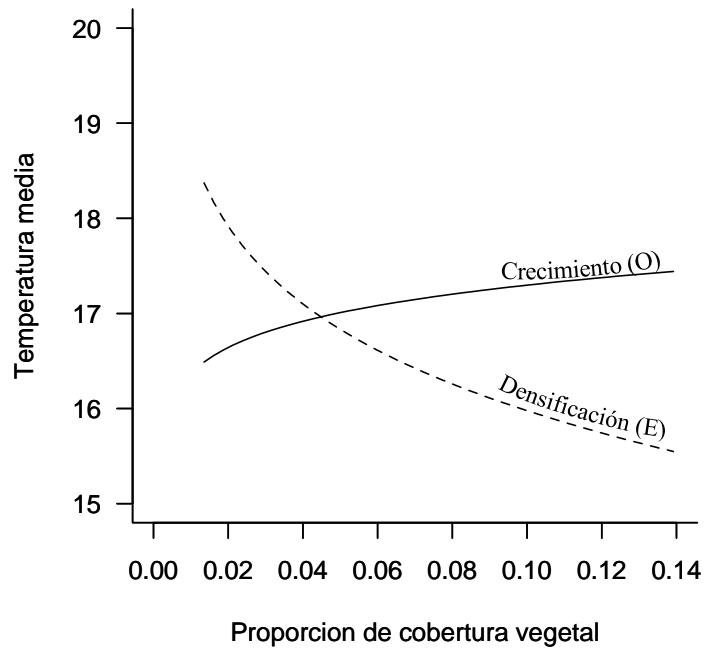


Figura 48 Efectos de la cobertura vegetal (gráfica superior) y la cobertura urbana (gráfica inferior) Sobre la temperatura media para el mes de enero (este y oeste). Según el modelo de regresión múltiple (Tabla 13). La línea continua y la línea punteada son las relaciones para el extremo oeste (111.0617°W) y este (111.0117°W) respectivamente, del área de estudio.

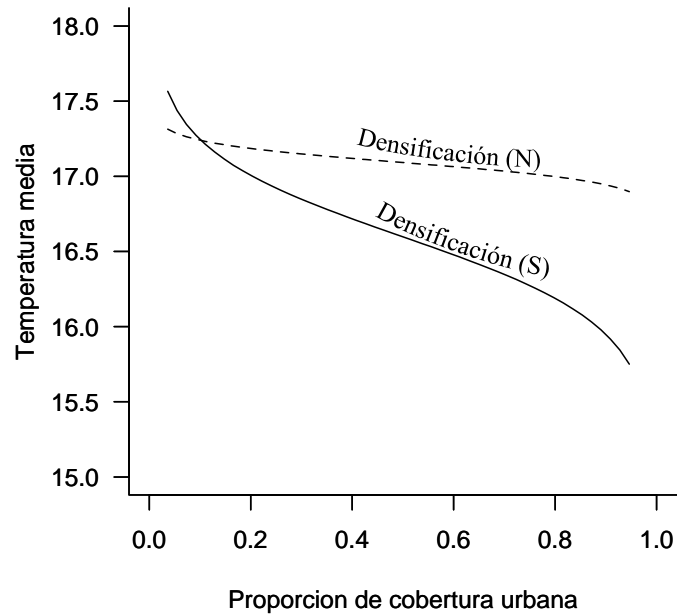
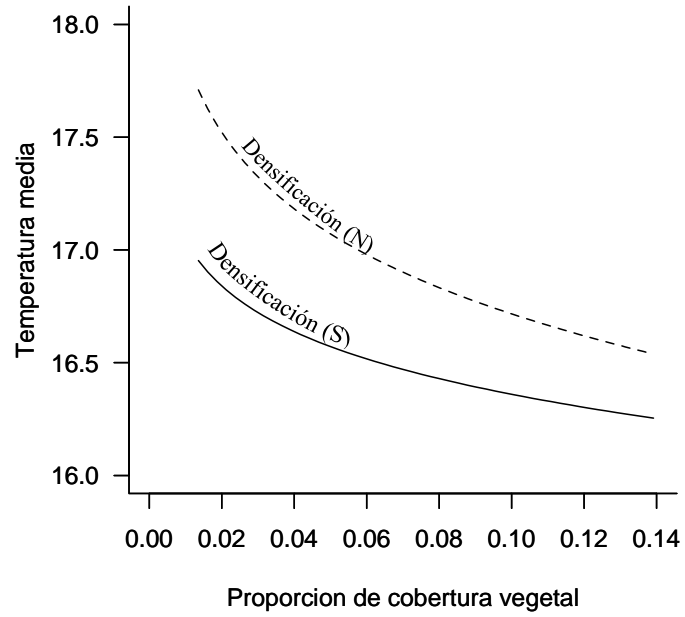


Figura 49 Efectos de la cobertura vegetal (gráfica superior) y la cobertura urbana (gráfica inferior) sobre la temperatura media para el mes de enero (sur y norte). Según el modelo de regresión múltiple (Tabla 13). La línea continua y la línea punteada son las relaciones para el extremo sur (29.0724°N) y norte (29.1239°N) respectivamente, del área de estudio.

DISCUSIONES

1. Crecimiento urbano y expansión poblacional de la ciudad de Hermosillo

La ciudad de Hermosillo se puede comparar en área urbana y carga poblacional con diferentes ciudades del norte del país: Chihuahua, Chihuahua (Figura 50), localizada en paralelo 28°N, Zona Metropolitana de Saltillo, Coahuila (Figura 51), localizada en el paralelo 25°N y Mexicali, Baja California (Figura 52), localizada en el paralelo 32°N, que son ciudades que se encuentran entre los 700 mil a 1 millón de habitantes.

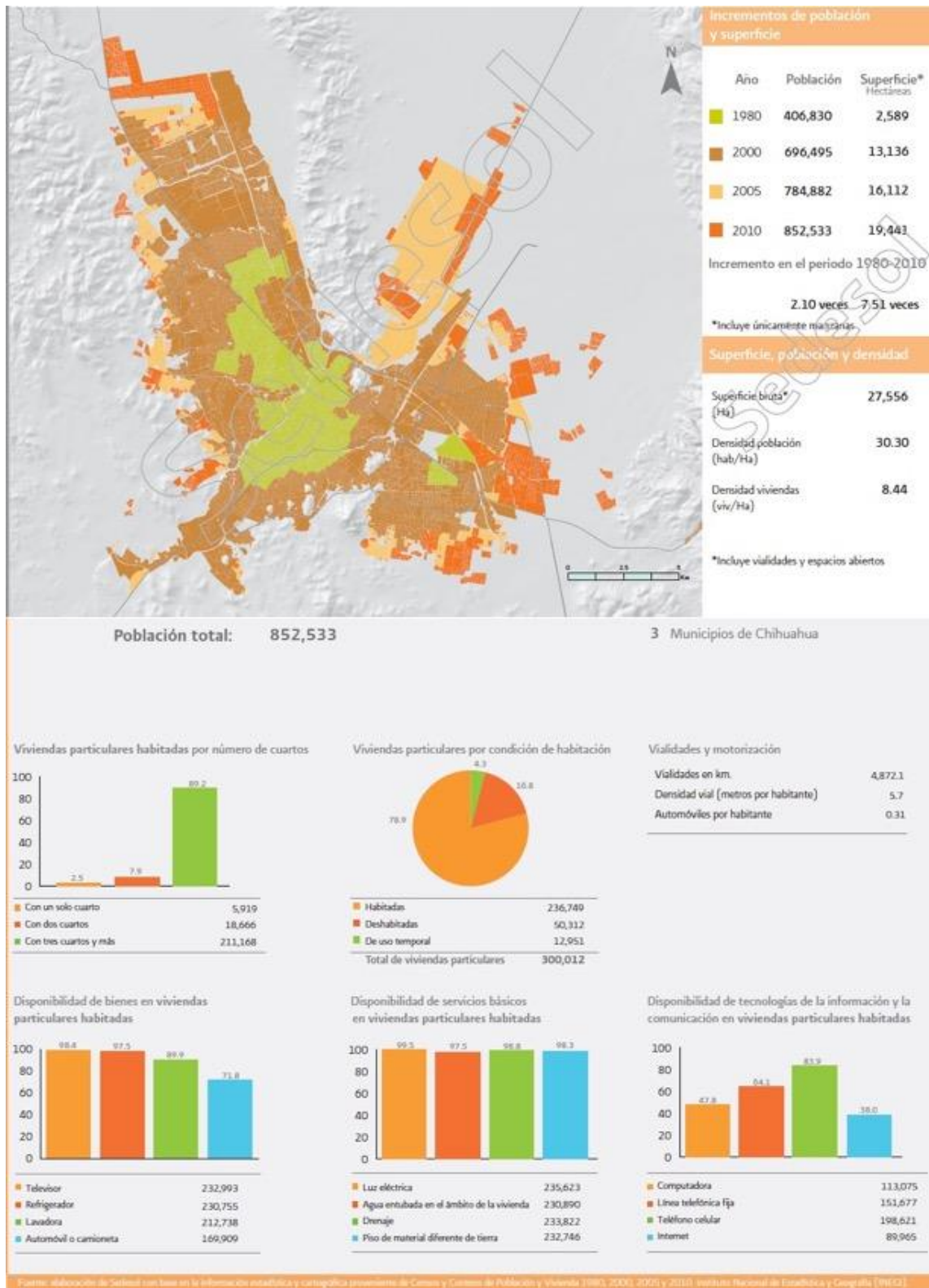


Figura 50 Crecimiento Urbano de la ciudad de Chihuahua, Chihuahua. Mapa del crecimiento de la ciudad (Superior), Gráficas de población y vivienda (inferior). Fuente: Expansión de las ciudades 1980-2010, SEDESOL, 2012.

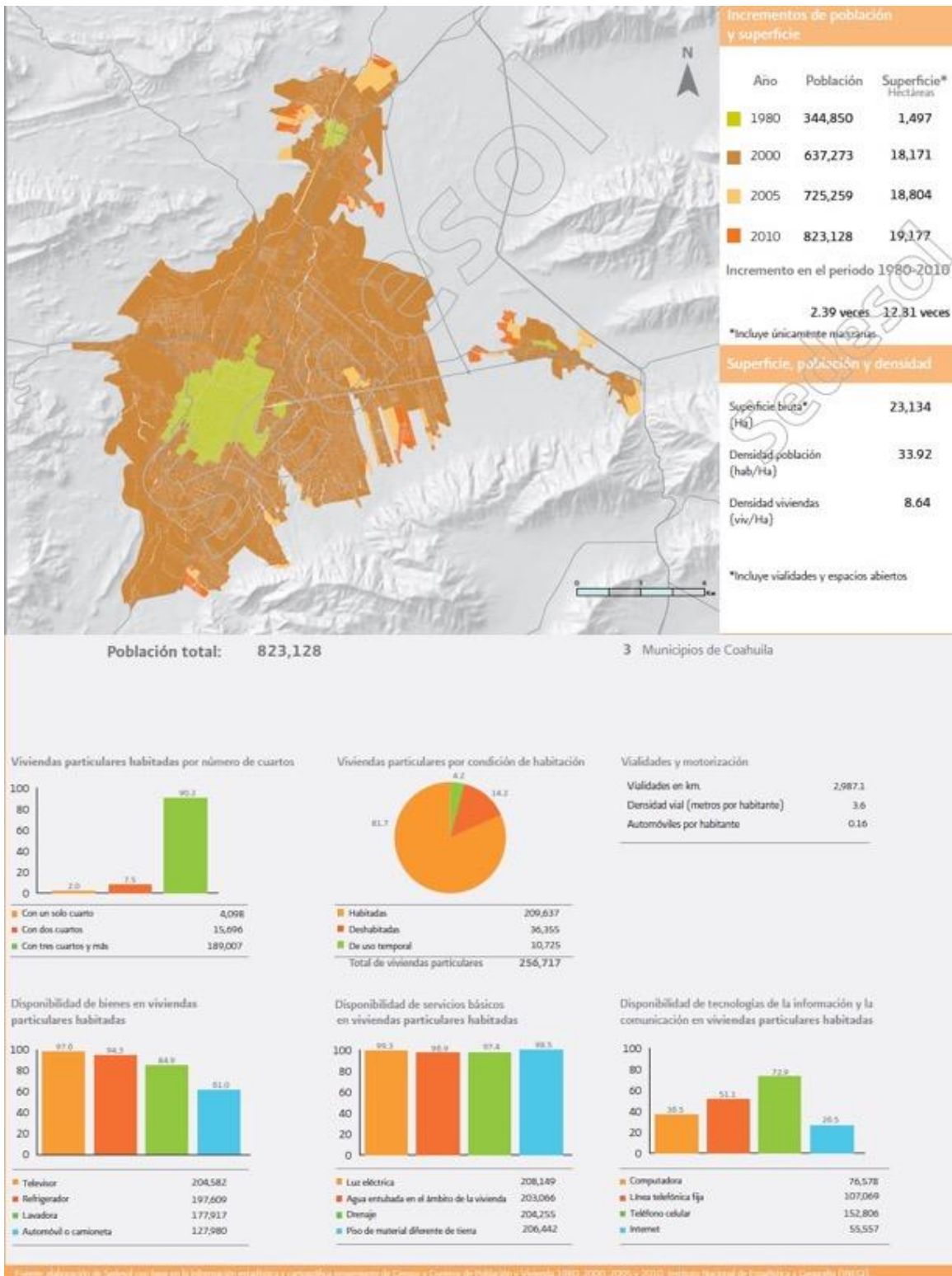


Figura 51 Crecimiento Urbano de Ciudad de Saltillo. Mapa del crecimiento de la ciudad (Superior), Gráficas de población y vivienda (inferior). Fuente: Expansión de las ciudades 1980-2010, SEDESOL, 2012.

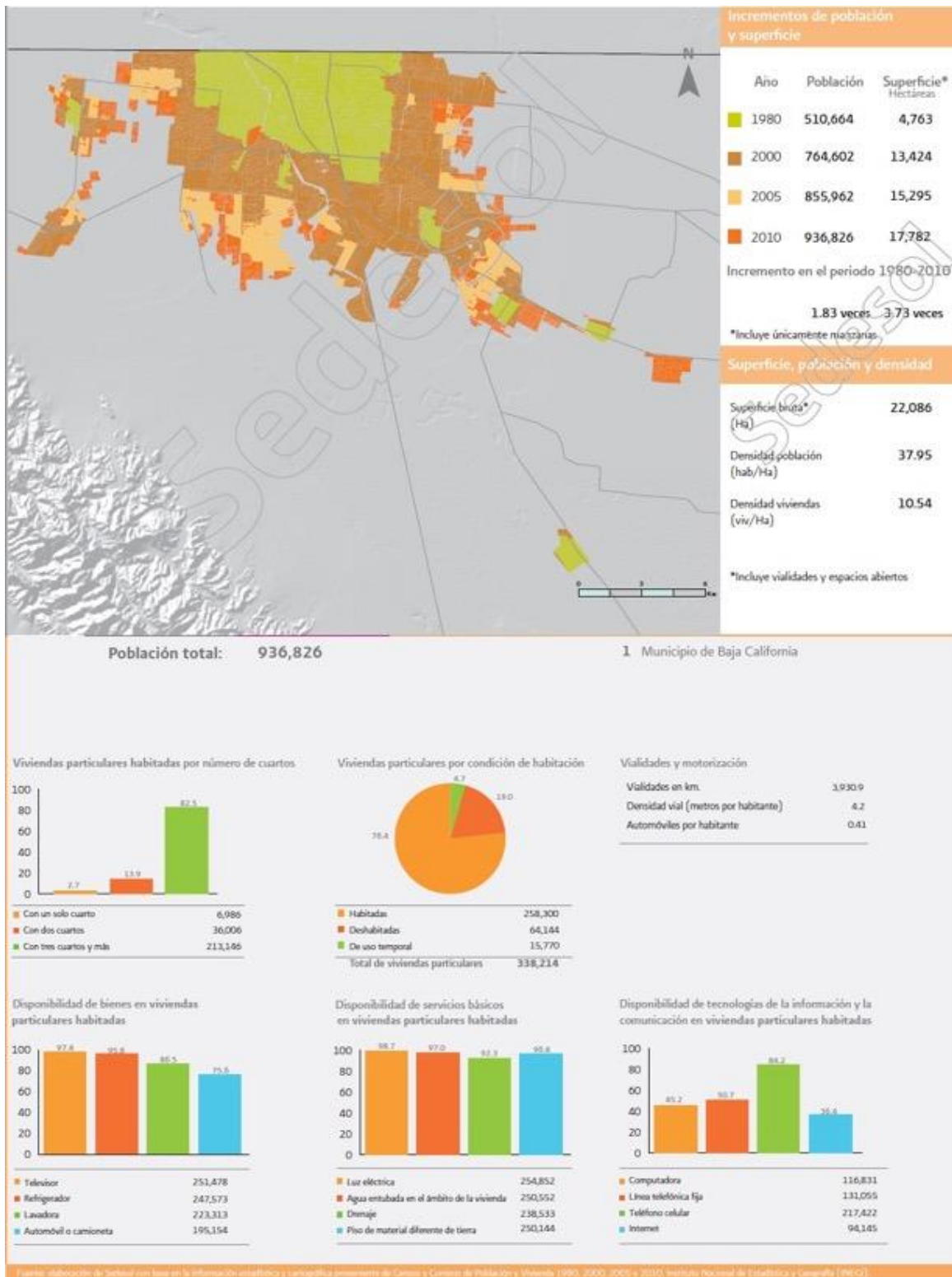


Figura 52 Crecimiento Urbano de la Ciudad de Mexicali. Mapa del crecimiento de la ciudad (Superior), Graficas de población y vivienda (inferior). Fuente: Expansión de las ciudades 1980-2010, SEDESOL, 2012.

En general mientras que la ciudad de Hermosillo creció en población 2.41 veces, y 5.27 veces su área urbana en ese mismo periodo (Figura 2), Mexicali creció 1.83 veces su población y 3.73 veces su área urbana (Figura 52). Saltillo presentó un aumento de 2.39 veces su población y 12.31 veces su área urbana (Figura 51). Por último, Chihuahua aumentó su población 2.1 veces y su área urbana 7.51 veces. (Figura 50) (SEDESOL, 2012).

El crecimiento en el número de habitantes tiene un comportamiento similar en las ciudades del norte del país. En cuanto al crecimiento urbano se detecta una expansión arbitraria en década del 2000, comparada con el número de habitantes, en las mismas ciudades. Este crecimiento varió entre las ciudades, donde Mexicali mostró un panorama más conservador con respecto a las otras y el más similar a Hermosillo, no fue mayor que en Chihuahua y Saltillo (SEDESOL, 2012).

En los últimos años, del periodo del 2016 al 2022 se ha desacelerado el crecimiento de Hermosillo. Pasó de tener un ritmo de expansión de casi 4% anual, a crecer entre el 1% y 2% anual. Para el poniente de la ciudad el crecimiento se dio de manera segregada, dejando vacíos mientras empujaba los límites, cuando se dio el proceso de expansión la cobertura arbórea disminuyó (Figura 45 y 39), y en el caso de los vacíos se han mantenido disponibles para el desarrollo.

Se puede confirmar que la prolongación de vialidades estructurantes o primarias, la mezcla del uso de suelo y una topografía relativamente plana incentiva la expansión (Chavira-Quiñonez & Rios-Quezada, 2018). La política de suelo, localización de equipamientos de escala y fuentes de empleo también incentivan a la consolidación y densificación del espacio urbano, un proceso que se detecta posterior a la expansión. También se detectaron asentamientos irregulares, que tienen un crecimiento más lento y disperso.

El rango de densidad de población más alto en la zona poniente de Hermosillo es de 250 a 400 hab/ha, que coincide con la información del Atlas de Riesgos y peligros para el municipio de Hermosillo (IMPLAN & Protección Civil, 2015), donde detectaron grado Alto y Medio de marginación, que son resultado de alguna forma de exclusión.

2. Calidad del aire de Hermosillo respecto a la concentración de las partículas suspendidas PM₁₀ y su relación con variables meteorológicas.

Actualmente pocas ciudades del país mantienen un monitoreo regular de la calidad del aire, ya que en el informe nacional de la calidad del aire 2020 (INECC , 2022), registran la falta de datos durante su operación. Con la información disponible se puede comparar los resultados entre las tres ciudades con las que Hermosillo comparte similitudes. Mexicali, que presentó mala calidad del aire en partículas suspendidas PM₁₀ con concentraciones máximas promedio de 213 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 24 h y 74 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio anual. Chihuahua con promedios de hasta 189 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 24 h, y 54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio anual. Saltillo alcanza 171 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de promedio en 24 horas y de 48 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio anual (INECC , 2022). Mientras que Hermosillo el promedio máximo para 24 h fue de 137 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y de 44.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio anual. Las ciudades superaron los límites permisibles, siendo Hermosillo la que presenta los promedios más bajos.

Las cuatro ciudades presentan un patrón similar en el comportamiento anual del particulado atmosférico siendo el periodo entre noviembre y febrero donde regularmente se manifiestan las concentraciones más altas, se relaciona con los meses fríos debido a las condiciones meteorológicas, el fenómeno de la inversión térmica, el aumento de emisiones de fuente de combustión para generar calor y la reducción de la actividad biológica, se manifiesta principalmente en la vegetación caducifolia, mismos que contribuyen a efectos negativos en la calidad del aire y la salud humana (Duarte-Tagles, et. al, 2021).

En general para Hermosillo se presentaron los valores más altos del periodo en el año 2017, que coincide con áreas de crecimiento de la ciudad al poniente como uso de graveras (Figura 40), y una tendencia a la baja de las concentraciones, posiblemente relacionado con el aumento en la densidad de la cobertura arbórea en las zonas urbanas ya consolidadas.

En cuanto al comportamiento intradiario de la concentración de partículas, se mantuvo en concentraciones altas durante todo el día en los meses de diciembre y enero con picos durante la noche (Tabla 8 y 9), identificando un desplazamiento entre los picos de una estación a otra de 4 horas, ya que la estación poniente presenta su pico entre la 1 y 3 am, y el norponiente entre las 7 y 9 am, siendo esta ultima la que presenta los promedios más altos durante estos meses. Esto

sucede debido a que los vientos dominantes en esos meses se presentan desde SE y ESE, y recorren a lo largo de 5.5 km las partículas suspendidas que se encuentran a su paso hasta ser detectadas en mayores concentraciones al norponiente.

La topografía de la ciudad también juega un papel importante en la calidad del aire, ya que el río Sonora representa un valle con una pendiente más pronunciada hacia el norte (Figura 53), donde también podemos encontrar barreras montañosas que impiden la liberación de la carga de partículas hacia afuera de la mancha urbana, volviéndose depósitos temporales, ya que en el periodo de lluvias el material sedimentado regresa al valle para generar un ciclo en la resuspensión (Meza-Figueroa et al., 2016; García-Rico et al., 2016).

La situación particular de la zona de muestreo norponiente impedía los vientos de dirección sur, por la misma topografía (Ver Anexo 3), y las barreras cerriles más al norte provocaron el retorno y estancamiento de las partículas en dicha zona. Esta dinámica se puede comprobar con los datos de la dirección y velocidad del viento que se registraron en la misma estación (Figura 22 y 23).

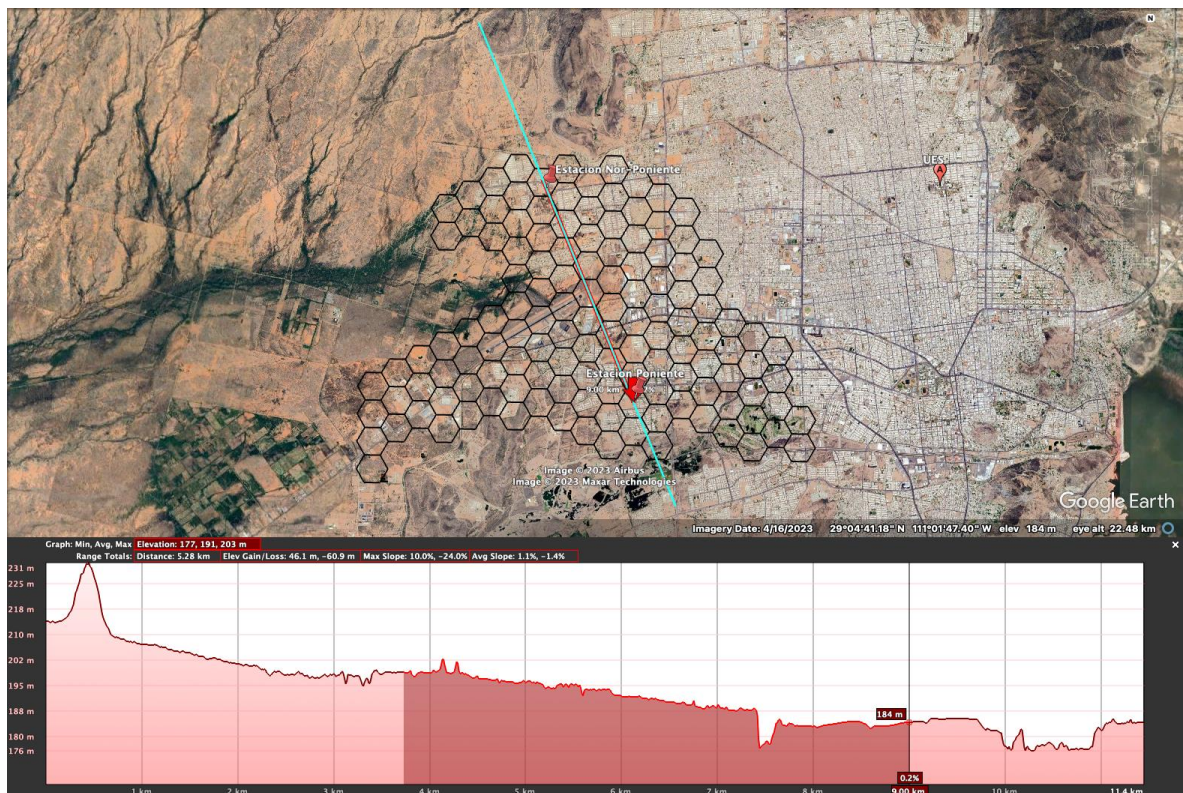


Figura 53 Elevación y topografía entre estación poniente y norponiente.

La tendencia para el Poniente se mantiene durante todo el año las concentraciones más altas localizadas al oeste, con variación aproximada de $22.76 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en enero (Figura 54, izquierda) y se espera que la variación en agosto sea de $9.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figura 54, derecha). Las concentraciones también varían a lo largo del año, encontrando las más altas en los meses fríos y las más bajas en los meses húmedos.

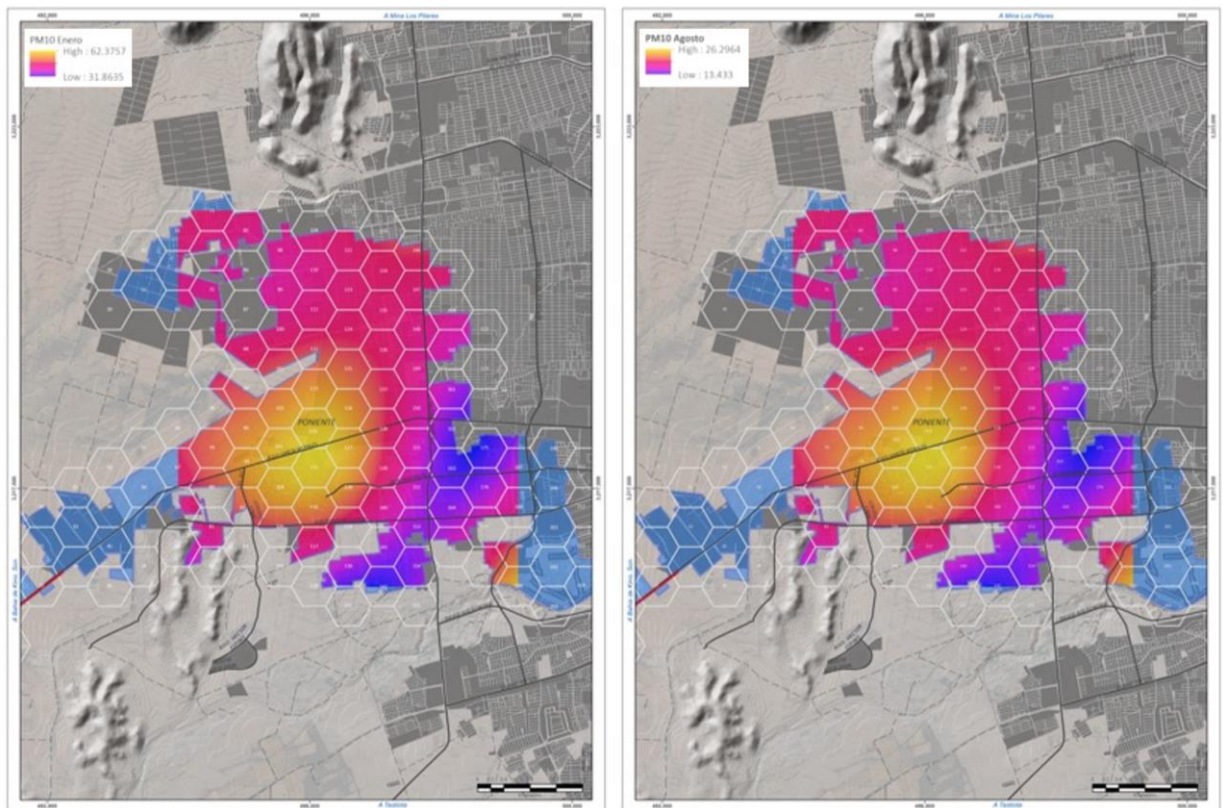


Figura 54 Tendencia de los valores de material particulado PM_{10} . Los mapas muestran una gradiente generada a partir de SPLIN donde el color amarillo (claro) hace referencia a la alta concentración de PM_{10} , la transición a rojo, rosa hasta llegar a azul las bajas concentraciones de PM_{10} . A la derecha los valores correspondientes al mes de agosto y a la izquierda interpretan al mes de enero. Fuente: Elaboración propia.

La tendencia de la temperatura en la zona poniente presenta variación de 0.4136°C en enero (Figura 55, izquierda) donde los valores más altos se presentan al centro del polígono orientados SSO-NNE, y los valores más bajos se presentan en una orientación similar al norte y al sur. Para agosto la variación en el polígono se espera sea de 0.5771°C , y con una distribución bajo la misma orientación, predominando las temperaturas altas al centro del polígono (Figura 55, derecha).

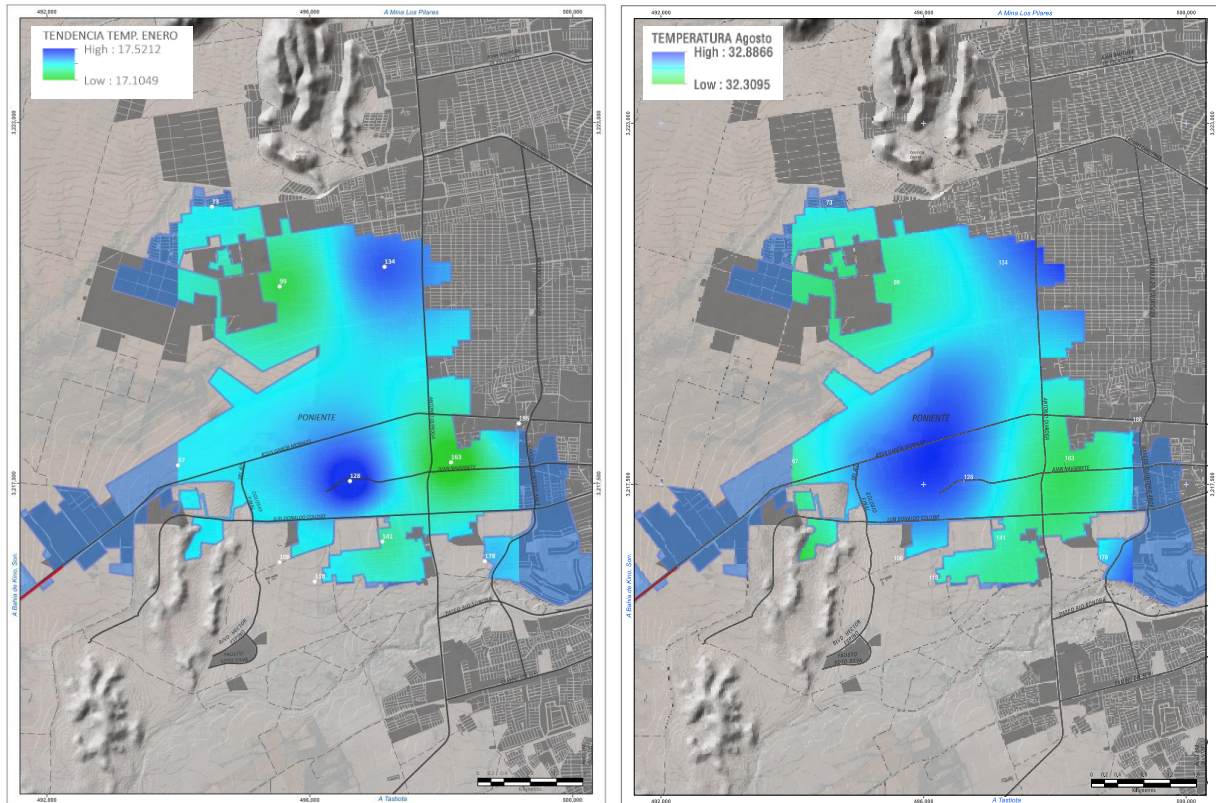


Figura 55 Tendencia de los valores de temperatura en la zona poniente. Los mapas muestran un gradiente generado a partir del método de interpolación SPLIN donde el color azul hace referencia a la temperatura alta, el cian las temperaturas moderadas y el verde las temperaturas bajas. A la derecha los valores correspondientes al mes de agosto y a la izquierda interpretan al mes de enero. Fuente: Elaboración propia.

Al comparar los datos de temperatura de las estaciones de monitoreo con respecto a la línea base del promedio histórico de la estación 26139 se detectó que las temperaturas máximas que se alcanzaron al interior de la ciudad se centran en el mes de junio. En nuestro año de monitoreo con los sensores, detectamos que la estación poniente presentó en junio un máximo de 45.3°C ,

que se encuentra por encima de la normal, esta misma fue superada en septiembre con 45.7°C, lo que representa una anomalía en los datos con respecto a la normal climática.

En el mismo sitio a mediados de septiembre se registraron niveles extremadamente altos de particulado, por encima de los 3,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ que se repitió durante varios días consecutivos. Las fechas coinciden con trabajos de recarpeteo y movimientos de tierra para construcción de vivienda a menos de 1 km de la ubicación de los sensores, la velocidad promedio del viento disminuye en esa época antes de entrar el periodo frío, lo que contribuye a que las partículas permanezcan suspendidas periodos más prolongados de tiempo.

Por otro lado, la física de partículas explica que dependiendo de la composición del material particulado es capaz de absorber mayor o menor energía, en este caso la radiación solar es absorbida por las partículas en suspensión y liberada como calor, aumentando la temperatura en el aire circundante y producir un efecto de calentamiento radiativo (Crespo Barrera, 2017), lo que también explica que se presentaran máximas anómalas de temperatura en el mes de septiembre.

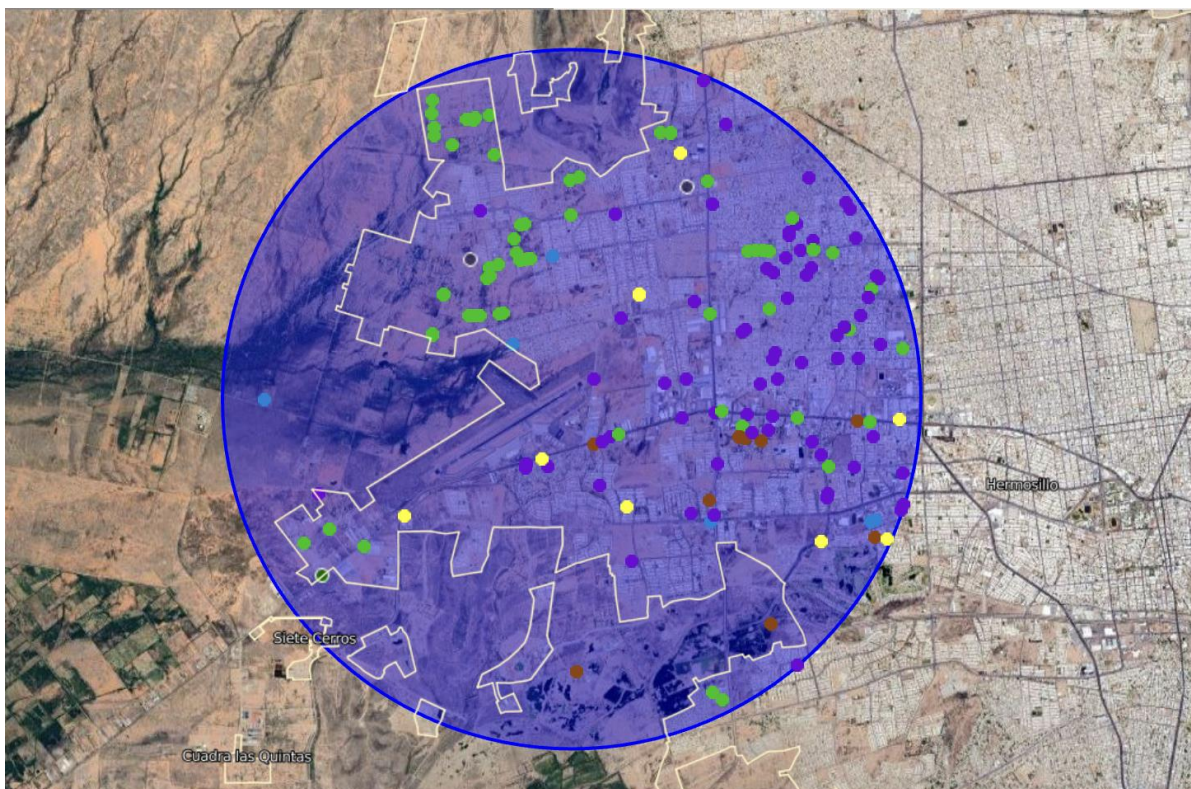


Figura 56 Unidades Económicas cuyas actividades afectan negativamente la calidad del aire.
Fuente: Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE), INEGI.

Ya que es evidente la aportación al aumento de partículas suspendidas PM_{10} derivadas de las actividades humanas, el Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE) consultado en junio 2023 para un radio de 5 km (Figura 56), abarcando la zona poniente, registra entre las actividades relacionadas con procesos de emisiones de material particulado el siguiente número de Unidades Económicas para las actividades identificadas (Ver Anexo 5).

- 41 - Fabricación de ladrillos no refractarios
- 17 - Otros servicios relacionados con la construcción
- 14 - Edificación de vivienda unifamiliar
- 11 - Fabricación de productos a base de piedras de cantera
- 7 - Construcción de carreteras, puentes y similares
- 7 - Construcción de obras de urbanización
- 7 - Fabricación de concreto

Gran parte de la zona urbana que se encuentra en crecimiento al se desplanta sobre suelos *calcisol* al centro y sur del area de estudio (Figura 57). La zona urbana norte que se encuentra en etapa de consolidacion se desplanta sobre suelos *cambisol* y al centro de identificaron suelos *regosol*. Mientras que las actividades de crecimiento y construccion suceden sobre suelos *calcisol*, las actividades de extraccion de materiales de construccion y grava se encuentran sobre suelos *Phaeozems* y *Calcisoles*.

3. Cobertura arbórea del poniente de la ciudad

En investigaciones anteriores en la ciudad de Hermosillo (Ortega-Rosas et al., 2020), se han detectado asociaciones entre la disminución de la concentración de PST y el aumento de la cobertura vegetal, así como una disminución en la temperatura. También se relacionan las vialidades sin pavimentar a valores mayores de concentración de PST y oscilación térmica. También, se señala a la zona oeste-noroeste como una de las zonas más vulnerables a los efectos de altas concentraciones de PST y mayor temperatura.

Dentro de la ciudad los estudios realizados para cuantificación e identificación de vegetación han dejado en evidencia el dominio de 70.8% de especies introducidas contra un 29.2% de especies nativas para su uso al interior, en parques y jardines de la ciudad, donde no superan el 33% de cobertura en los espacios muestreados (Ortega Rosas, et.al., 2022).

Mientras que en los resultados de la presente investigación se obtiene una cobertura promedio entre las muestras (hexágonos de 31.1 ha) en terreno natural entre el 9% y el 12%, y de más del 20% en presencia de escurrimientos con variación mínimas en el periodo. En espacios urbanizados ya consolidados la cobertura aumentó, obteniendo muestras con más del 10% de área cubierta por árboles, que puede ser el resultado de la aplicación de la política pública a programas de reforestación, infraestructura verde y participación ciudadana que han acelerado la recuperación de la vegetación en algunos puntos de la ciudad.

Sin embargo el mayor riesgo se encuentra en las zonas en proceso de crecimiento urbano que experimentaron una pérdida entre el 1% y 17% de la cobertura arbórea en el periodo, evidenciando la urbanización sobre los escurrimientos, que en términos de impacto urbano se puede traducir en la modificación de los ciclos hidrológicos naturales que aumentan el escurrimiento

superficial, tanto en volúmen como velocidad, y en casos graves llega a generar áreas de riesgo (Vidal & Romero, 2010) por priorizar la construcción sobre los servicios ambientales.

Con los datos de esta investigación se puede estimar que en la zona poniente el proceso de consolidación del área urbana ocupada entre 1980 y 2000 tomó un tiempo de 25 años para llegar a un estado completo de consolidación. Requiere en promedio un tiempo de 15 años más para recuperar la cobertura promedio presente en el terreno natural; y le toma 40 años la recuperación de los servicios ambientales desde su ocupación a la ciudad.

4. Impacto en el ambiente de Hermosillo por el crecimiento urbano.

Se puede confirmar que existe una relación tanto en el crecimiento de las ciudades, como en la variación de la cobertura vegetal que inciden en el aumento de los parámetros de temperatura y cantidad de partículas suspendidas en el ambiente.

La relación sucede en 3 etapas del proceso de expansión de la ciudad.

- **Primera Etapa: Crecimiento.**

Presenta una pérdida de la cobertura arbórea debido al crecimiento urbano, ocupación del territorio para construir y por lo tanto deforestación, aumenta la media de temperatura en meses secos y las concentraciones altas de material particulado PM_{10} en meses fríos. Las áreas de crecimiento son entonces las zonas más vulnerables a altas temperaturas y altas concentraciones de partículas en suspensión, así como a los efectos negativos que las olas de calor y mala calidad de aire tienen sobre la salud.

- **Segunda Etapa: Consolidación.**

Áreas ocupadas por el crecimiento de la mancha urbana que se encuentran en proceso de consolidación. Inicia un incremento de la cobertura urbana, y una disminución ligera de PM_{10} , de igual forma el promedio diario de temperatura disminuye, aunque estas variaciones son dependientes de la estación del año. También se mantiene un aumento mínimo del área de cobertura vegetal ya que sigue en proceso de desarrollo.

- **Tercera Etapa: Densificación.**

El crecimiento urbano ha llegado a su máximo, se presenta una recuperación de la cobertura arbórea lo que provoca una disminución de la temperatura media, y los riesgos a la

salud por partículas PM_{10} se ven disminuidos ya que el arbolado aumenta el potencial de retención y captura de este material particulado.

La disminución de la cobertura arbórea en el proceso de expansión se relaciona con el aumento de material particulado en el ambiente, que a su vez afecta de manera local la temperatura al aumentar bajo los efectos de la radiación solar, y a la inversa el aumento de arbolado disminuye los parámetros de temperatura y Pm_{10} .

Los resultados estadísticos nos muestran que existe una relación significativa negativa en la relación a entre la Cobertura Arbórea y las partículas PM_{10} , así como en la media de Temperatura ($>$ cobertura arbórea $<$ PM_{10} y $<$ temperatura). Es decir, al incrementar la cobertura arbórea disminuyen la concentración de PM_{10} y la temperatura promedio diaria. También muestran una relación positiva entre el Crecimiento Urbano y las partículas PM_{10} , así como en la media de Temperatura ($>$ crecimiento urbano $>$ PM_{10} y $>$ temperatura), lo que implica que al incrementar el crecimiento o expansión de la mancha urbana se incrementa la concentración de PM_{10} y se registra un aumento de las temperaturas promedio diarias. Todo lo anterior valida nuestra hipótesis planteada.

CONCLUSIONES

La investigación evaluó el impacto que el crecimiento urbano y la cobertura vegetal tienen sobre la calidad del ambiente. Se ha analizado como el crecimiento de la ciudad, el aumento de la población, las actividades locales han contribuido al deterioro de la calidad del aire y los efectos sobre la salud. Además, se ha detectado la importancia de abordar los problemas ambientales identificados a partir de la información generada, con la que podemos concluir lo siguiente:

- El aumento en el crecimiento de la ciudad tiene un efecto negativo en la calidad del ambiente (PM_{10}) y temperatura (media) a nivel local. Y el aumento en la cobertura arbórea tienen un efecto positivo en la calidad del ambiente (PM_{10}) y temperatura (media) a nivel local, mismo que se ve en aumento hacia el centro de la ciudad.
- La concentración de PM_{10} en el aire está influenciada por factores estacionales y meteorológicos, como la inversión térmica y los vientos dominantes. Durante los meses fríos, se observa un aumento en las concentraciones de partículas debido a las condiciones climáticas y las actividades humanas relacionadas con la construcción, fabricación de ladrillos y emisiones por combustión.
- La topografía de la ciudad juega un papel importante en la retención y resuspensión de las partículas, con su valle y barreras montañosas, contribuyendo a la mala calidad del aire.
- Se pueden identificar 3 etapas en el comportamiento de los parámetros:
 - Crecimiento: áreas con pérdida de árboles debido al crecimiento urbano, aumento de las partículas en suspensión y temperatura, son los espacios más vulnerables de la ciudad.
 - Consolidación: áreas que están siendo ocupadas por el crecimiento urbano, en proceso de consolidación, manteniendo un aumento mínimo de la cobertura arbórea, disminución del particulado y la temperatura.
 - Densificación: áreas ya consolidadas (detiene el crecimiento urbano), reforestación y aumento de la cobertura arbórea que disminuye el particulado y la temperatura.
- Se estima que el tiempo de consolidación de la ciudad al poniente fue de 25 años, y de 15 años más para la recuperación de los servicios ambientales.
- El comportamiento intradiario indica que los niveles más altos de PM_{10} suceden durante la noche entre 12 am prolongándose hasta alrededor de las 8 am.

Por lo anterior se cumplió con los objetivos de la investigación al evaluar las variables y encontrar las relaciones espaciales, temporales y confirmar los efectos sobre el ambiente urbano. Se caracterizó su comportamiento y la variabilidad al encontrar relaciones espaciales en las etapas de crecimiento y estacionales a lo largo del año.

Esta información servirá de base para futuras investigaciones relacionadas, pero sobre todo podrá ayudar en los planes de desarrollo urbano del municipio y en los programas de atención a las problemáticas ambientales de la ciudad.

RECOMENDACIONES

Es importante generar estrategias para reducir la liberación de partículas a la atmosfera, ya que, con los niveles de radiación que presenta una ciudad desértica, aumenta el fenómeno de la isla de calor. La búsqueda del equilibrio entre el desarrollo urbano y la protección ambiental es esencial para garantizar un futuro sostenible y saludable para la ciudad. Por lo que se recomienda:

- Inhibir el crecimiento urbano en su horizontalidad, enfocarse en consolidar las áreas ya urbanizadas y llenar los vacíos urbanos, hacia adentro de los límites actuales. Impulsar proyectos de densificación incentivando la rehabilitación y reforestación del entorno.
- Generar planes maestros de recuperación del espacio al interior de la mancha urbana, la mezcla de uso de suelo con equipamiento, comercio, vivienda y espacio público, fomentando la diversidad, compacidad y cercanía a las fuentes de empleo. Dejar los planes parciales de crecimiento por un lado que tanto le cuestan recursos al ambiente y al municipio para administrar las nuevas rutas de infraestructura (agua, energía, comunicación, transporte...etc.)
- Respetar los depósitos naturales de sedimentos, escurrimientos, ríos y arroyos, así como los sistemas cerriles que representan los servicios ecosistémicos de la ciudad. Conectarlos a la infraestructura verde urbana al interior de la ciudad por medio de corredores ecológicos y biológicos, que permitan capturar las partículas suspendidas y los escurrimientos (reglas presentes en el programa de desarrollo de Hermosillo que se deben de aplicar de manera contundente y firme).
- Controlar la expansión por medio de cinturones verdes, el cual consiste en un perímetro de más de 1 km de mezquites mismos que inician en los límites marcados por los polígonos de contención urbana. Dando prioridad a generar un macrosistema de enfriamiento para la ciudad, integrando estrategias bioclimáticas a gran escala para capturar y aumentar la velocidad del viento que entra de manera natural por el SO, SSO sobre el Rio Sonora, Parque Metropolitano por medio de la reforestación con plantas nativas, hasta tener el bosque Surponiente. Así mismo conectar por medio de un corredor verde a la presa Abelardo L. Rodríguez.

- Impulsar los Polígonos de Actuación Concertada (PAC) y otros instrumentos que promuevan nuevos desarrollos intraurbanos integrales, densos, seguros, complejos, conectados, diversos, inteligentes, sanos, sustentables y sostenibles.
- Prestar mayor atención a las zonas vulnerables, áreas de crecimiento, ubicadas al poniente, norponiente, norte, y nororiente. Evaluar los niveles de particulado en el valle norte mediante la instalación de sensores en línea, para poder acceder a la información en tiempo real, y dejar un registro histórico para su futura evaluación.
- Continuar con los programas de infraestructura verde de manera firme y contundente, así como promover e impulsar la participación ciudadana en las actividades de reforestación, que parece ser una de las estrategias que ha funcionado.
- Impulsar un sistema de movilidad integral sustentable, asequible, moderna y eficiente, que motive a reducir el uso del automóvil, reducir la carga vial, y poder recuperar espacio público que ha sido entregado al vehículo.
- Promover un paisaje autóctono al interior de la ciudad por medio la reforestación con plantas nativas, esto genera un vínculo cultural y patrimonial a través del tiempo, además de reducir el gasto de agua por la demanda que tienen las especies introducidas.
- Explorar la posibilidad de desarrollar bajo el suelo, edificios subterráneos, vialidades subterráneas, sistema de transporte subterráneo, vivienda subterránea, con el motivo de no perder servicios ambientales, y aprovechar las propiedades de termoacústicas del suelo para reducir el desperdicio de recursos, de espacio y energía.
- Plantas de tratamiento de aguas residuales en nuevos desarrollos, que garanticen el aprovechamiento del recurso para sistemas de riego compartidos al interior de la ciudad, de manera que acelere la densidad vegetal que ayudara a reducir el particulado y la temperatura al interior.
- Regulación de las actividades afectan la calidad del aire del sector, como depósitos de escombros, ladrilleras, graveras, cementeras ya que se encuentran en la ventana de viento de la ciudad, y sus emisiones, por los vientos dominantes, terminan dentro de la ciudad y esperando los meses fríos su re-suspensión.
- Identificar regiones prioritarias de conservación, áreas de valor ambiental, y zonas de recuperación, así como su conexión entre sí, para estimular la densificación de la cobertura arbórea.

LITERATURA CITADA

Ambient, LLC. (25 de 10 de 2021). ambientweather.com. Obtenido de ambientweather.com: <https://ambientweather.com/amws2000.html>

Brito-Castillo, L., & Díaz, M. A. (2010). Clima. En F. Molina Frenaner, & T. Van Devender, *Diversidad Biológica de Sonora* (Vol. 1, págs. 73-96). México: Universidad Autónoma de México.

Chavira-Quiñonez, M. F., & Rios-Quezada, G. (2018). Aplicación de los sistemas de información geográfica y técnicas de análisis espacial para analizar el crecimiento urbano inducido por las vialidades. *Academia Journals Celaya*, 929-934.

Crespo Barrera, P. (2017). Análisis del depósito atmosférico y caracterización experimental de partículas suspendidas en la Ciudad de México. Universidad Autónoma de Puebla, <https://hdl.handle.net/20.500.12371/518>.

Davis Instruments. (10 de 2021). davisinstruments.com. Obtenido de davisinstruments.com: <https://www.davisinstruments.com/pages/airlink>

Duarte-Tagles, H., Alvarez-Chavez, A., & Ojeda, A. (2021). Diagnóstico de salud ambiental del Centro de Población de Hermosillo, Sonora. Hermosillo, Sonora: Universidad de Sonora.

Enciso Miranda, C. A. (2016). Identificación de zonas prioritarias para reforestación en la ciudad de Hermosillo, Sonora. Universidad Estatal de Sonora.

Federación, D. O. (27/10/2021). NOM-025-SSA1-2021. NORMA Oficial Mexicana.

Frick Raggi, J. P. (2018). Análisis de la relación entre temperaturas superficiales y tejido urbanos como insumo para la planificación urbana. *Espacio y Desarrollo*, 32, 75-98. doi: <https://doi.org/10.18800/espaciodydesarrollo.201802.004>

García-Rico L, Meza-Figueroa D, Gandolfi AJ, Del Río-Salas R, Romero FM, Meza-Montenegro MM. Dust-Metal Sources in an Urbanized Arid Zone: Implications for Health-Risk Assessments. *Arch Environ Contam Toxicol*. 2016 Apr;70(3):522-33. doi: 10.1007/s00244-015-0229-5. Epub 2015 Oct 3. PMID: 26433809.

Gifreu - Font, J. (2018). Ciudades Adaptativas y Resilientes ante el Cambio Climático: Estrategias locales para contribuir a la sostenibilidad urbana. *Revista Aragonesa de Administración Pública*, 102 - 158.

González , M. E., Jurado, E., González, S., Aguirre, O., Jiménez, J., & Nevar, J. (2003). Cambio Climático Mundial: Origen y Consecuencias. UANL, Red AL y C (redalyc.org)., 1-10. Obtenido de <https://www.redalyc.org/>.

Gutiérrez-Ruacho, O., Brito-Castillo, L., Ortega-Rosas, C., Villarruel-Sahagun, L., Macias-Duarte, A., Jumenez-Lagunes, A., & Casanovas-Garcia, L. (2018). Análisis de la Variabilidad de las temperaturas y lluvias en la ciudad de Hermosillo, Sonora, México para la evaluación del Riesgo ambiental local y regional. *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*, 93-121.

IMPLAN, & Protección Civil. (2015). Atlas de Riesgos del Municipio de Hermosillo 2014. Hermosillo: Ayuntamiento de Hermosillo.

INECC. (2022). Informe Nacional de la Calidad del Aire 2020. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Dirección de Investigación de Calidad del Aire y Contaminantes Climáticos. México: SEMARNAT.

INEGI. (2005). Guía para la interpretación de cartografía climatológica. México: www.inegi.gob.mx.

Larraga, R. C. (2015). Filosofía de la Ciencia de la sustentabilidad del medio ambiente urbano. Guadalajara, Jalisco: GROPELIBROS.

López-Blanco, J., & Rodríguez-Gamiño, M. (2008). Desarrollo de indicadores ambientales y de sustentabilidad en México. Ciudad de México: Instituto de Geografía de la UNAM.

Marambio-Castillo, A., Romano-Grullón, Y., Crespo, M. C., & Colaninno, N. (2017). Guía Metodológica para la Elaboración y Actualización de Programas Municipales de Desarrollo. Ciudad de México: SEDATU, SEMARNAT, GIZ.

Martínez Salido, J. (2017). ANÁLISIS DE LA COBERTURA VEGETAL Y COMPOSICIÓN DE ESPECIES DE PARQUES Y JARDINES DE HERMOSILLO. Hermosillo, Sonora, México: Universidad Estatal de Sonora.

Mercado, L., & Marincic, I. (2017). MORFOLOGÍA DE ISLA DE CALOR URBANA EN HERMOSILLO, SONORA Y SU APOORTE HACIA UNA CIUDAD SUSTENTABLE. Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud, 0-8.

Meza Aguilar, M., & Moncada Maya, J. O. (2006). Las áreas Verdes de la Ciudad de México. Un reto actual. UNAM, 1-18.

Meza-Figueroa, D.M., González-Grijalva, B., Río-Salas, R.D., Coimbra, R., Ochoa-Landín, L., & Moreno-Rodríguez, V. (2016). Traffic signatures in suspended dust at pedestrian levels in semiarid zones: Implications for human exposure. Atmospheric Environment, 138, 4-14.

Ochoa-Zaldivar, M., Castellanos -Martínez, R., Ochoa-Padierna, Z., & Oliveros-Monzon, J. (2015). Variabilidad y cambios Climaticos: su repercusión en la salud. <http://scielo.sld.cu/>.

OMS. (2006). Guías de calidad del aire OMS relativas al particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Ginebra, Suiza: Organización mundial de la salud.

ONU. (2018). Marco de Indicadores mundiales para los Objetivos de Desarrollo Sostenible y metas de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Varias.: Naciones Unidas.

ONU. (28 de Febrero de 2021). sustainable development. Obtenido de <https://www.un.org/>: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/>

Ortega Rosas, C., Martínez Salido, J., Sánchez Duarte, N., & Morales Romero, D. (2022). Cobertura y composición arbórea en las áreas verdes de Hermosillo, Sonora: aportaciones al urbanismo sustentable. Region y Sociedad, <https://doi.org/10.22198/rys2022/34/1610>.

Ortega Rosas, C.I, M.C. Calderón-Ezquerro & O. G. Gutiérrez-Ruacho (2019): Fungal spores and pollen are correlated with meteorological variables: effects in human health at Hermosillo, Sonora, Mexico, *International Journal of Environmental Health Research*, DOI: 10.1080/09603123.2019.1625031 Ortega-Rosas, C. I., Enciso-Miranda, C. A.; Macias-Duarte, A.; Morales-Romero, D; Villarruel-.Sahagun, L. (2020). Urban vegetation cover correlates with environmental variables in a desert city: insights of mitigation measures to climate change. Springer, 1-19.

Q. Zhang, J. W. (2002). "Urban built-up land change detection with road density and spectral information from multi-temporal Landsat TM data". *Remote Sensing*, 3057 - 3078.

Rodríguez-Aldabe. (2018). Potenciar la resiliencia de las ciudades y sus territorios de pertenencia en el marco de los acuerdos sobre cambio climático y de la Nueva Agenda Urbana. Santiago: Naciones Unidas/CEPAL.

SEDATU, C. S. (2018). Sistema Urbano Nacional. México: SEDATU.

SEDESOL. (2012). La expansión de las ciudades en México 1990-2010. En S. Topelson, M. Uribe, & G. García. México: Gobierno Federal y SEDESOL.

Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (SINAICA). (22 de abril de 2021). Normas Oficiales Mexicanas (NOM) - Salud Ambiental. Obtenido de sinaica.necc.gob.mx: <https://sinaica.inecc.gob.mx/pags/noms.php>

Vidal, C., & Romero, H. (2010). Efectos Ambientales de la Urbanización de las cuencas de los ríos Biobio y Andalien sobre riesgos de inundacion y anegamiento de la ciudad de Concepción. Geolibros, Pontificia Universidad Católica de Chile, 1-19.

WindY. (2021). Windy.com. Obtenido de Windy.com: <https://www.windy.com/es/-Men%C3%BA/tools?temp,29.025,-111.474,5>

Zhao, G., Zheng, X., Yuan, Z., & Zhang, L. (2017). Spatial and temporal characteristics and correlation analysis of road networks and urban sprawl. *Nongrye Gongcheng Xuebao*.

Anexo 1: Plan de Vuelo.

Para obtener los valores que corresponden a cobertura vegetal se requiere la planificación del vuelo de un dron con características mínimas necesarias, las cuales definen el plan de vuelo ya que es necesario calcular el área de las muestras que va a registrar la aeronave.

Un vehículo aéreo no tripulado con la capacidad de ser controlado a distancia. Ya sea manualmente por radio control o por software con recorridos programados.

*RPAS – Sistema de aeronaves pilotadas a distancia
 UAS – Sistema aéreo no tripulado
 MAV – Vehículos aéreos no tripulados
 VANT – Vehículo aéreo no tripulado
 Dron, Drone*

Cálculo de la malla.

La malla se calcula a partir de conocer las especificaciones técnicas del RPAS.

Equipo: Mavic Air 2		
Tiempo de vuelo por batería		Dist. Max.V.
34 min (sin viento)	33 min (con viento)	18.5 km
Velocidad		
19 m/s (modo S)	12 m/s (modo N)	5 m/s (modo T)
Rango de precisión en vuelo estacionario		
Vertical:		Horizontal:
±0.1 m (con posicionamiento visual)		±0.1 m (con posicionamiento visual)
±0.5 m (con posicionamiento por GPS)		±1.5 m (con posicionamiento por GPS)
Sensor		
Fotografía (12 MP):	Fotografía (48 MP):	Resoluciones máx.

100-3200 (auto)	100-1600 (auto)	48 MP 8000×6000 píxeles
100-6400 (manual)	100-3200 (manual)	Ráfaga: 12 MP, 3/5/7 disparos
1/2" CMOS	Apertura: f/2.8	Formato equivalente a 35 mm: 24 mm

Nota: el resto de las especificaciones se pueden encontrar en el siguiente link:
<https://djimavic.mx/especificaciones-mavic-air-2/>

El objetivo del vuelo es poder visualizar con detalle las unidades de árboles superiores a 2 m de altura, se puede configurar a 12 o 48 mpx pudiendo volar:

- 12 MP a una altura entre 40 y 70 m.
- 48 MP a una altura entre 100 y 140 m (esta opción ahorrara batería y aumentara el área de la muestra, así como la demanda de memoria extraíble mini-SD).

Antes de definir la altura es importante consultar las normas restrictivas para el RPAS.

- ***La NOM-107-SCT3-2019 establece una restricción a 122 m de altura y 457 m del piloto, así como una velocidad máxima del fabricante.***
- Velocidad de 8 a 12 m/s

La cantidad de fotos que requiera dependerá del área, el recorrido en km, y el traslape (Porcentaje de recubrimiento estereoscópico) que para el nivel de detalle que buscamos se recomienda:

- Longitudinal 80%
- Lateral 60%

Ya que el objetivo es cuantificar la cobertura vegetal con 2 m de altura requerimos que las imágenes tengan ángulo de inclinación de la cámara (90° es para imágenes en 2D). Al inclinar la cámara apoya al registro de volúmenes (3D):

- 80° a 70°

Por lo tanto, el tamaño de las muestras para obtener el área de cobertura vegetal se define en base a la capacidad del RPAS (dron) para capturar una superficie máxima de 36 hectáreas, tomando en cuenta:

- 20 a 25 min de vuelo.
- Recorridos menores a 15 km
- Red de muestreo (preferentemente con polígonos hexagonales para maximizar los valores de las muestras).

Así se define la siguiente unidad de muestra, con un área aproximada de **31.1 ha**.

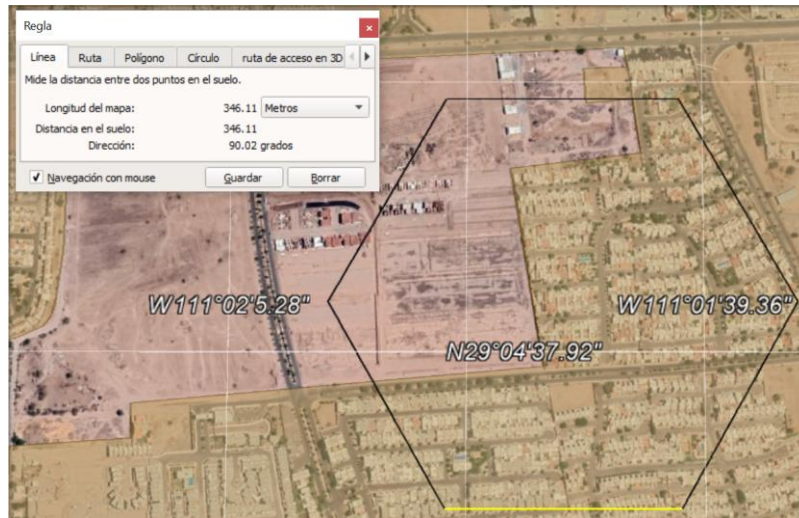
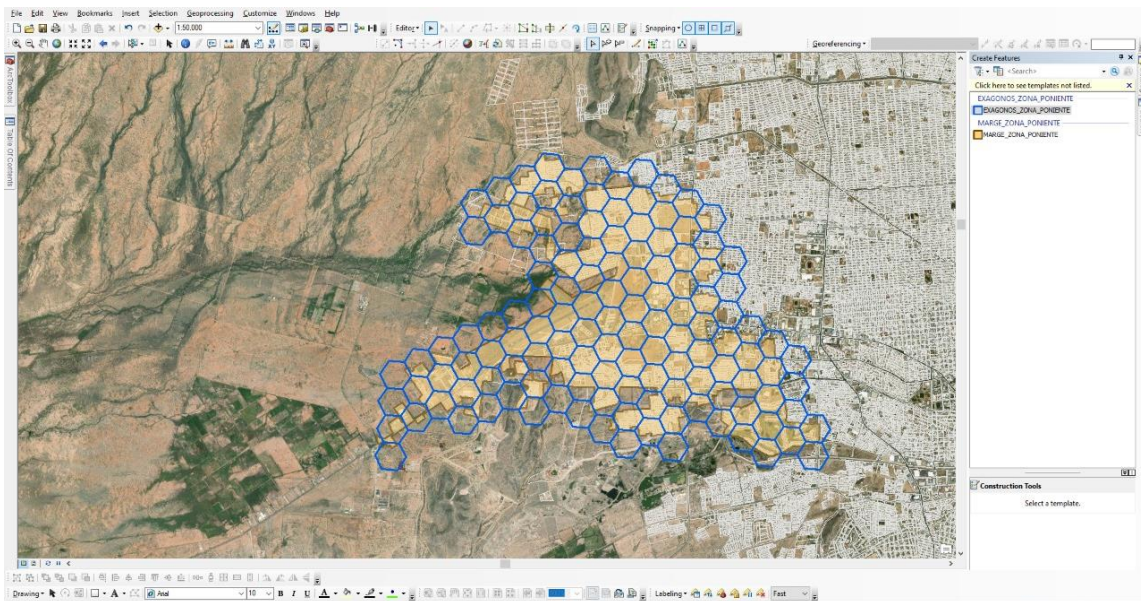


Ilustración . Dimensiones de unidad de muestra de la malla.

Para finalmente llegar a definir la malla para la zona de expansión del norponiente, misma que se identifica en la descripción metodología de la expansión urbana en el documento.



Tiempo de vuelo.

Se cuenta con 3 baterías que permite de 3 a 5 muestras por día. La garantía de los vuelos depende de los vientos que se presenten, ya que no es recomendable volar con vientos mayores a 28 km/h

- Se contempla 10 muestras por cada zona definida.
- Se dará prioridad a las 2 zonas consideradas vulnerables (ver documento

Muestras	Tiempo (hr)
600m*600m (1 batería)	1.5
Muestras por 3 días	4.5
Muestras por 5 días	7.5
20 muestras totales	de 5 a 8 días

- Se programa mediante la app integrada DJI GO 4 (que conecta controla el RPAS), Ctrl+DJI (que permite controlar al controlador del RPAS y otorgarle permisos a otra app) + Pix4Dcapture (donde se genera el polígono y plan de vuelo sobre el que trabajara el RPAS).

Ejecución de Vuelo.

1. Con base en los cálculos que se estimaron con las características del RPAS, se dimensionan los polígonos que formaran las muestras. Estos son los que resultaron del plan de vuelo.

Se generan los polígonos mediante Qgis y se exportan individualmente a KML.

2. Se seleccionan los polígonos a muestrear, la decisión en este caso se vio influenciada por las facilidades y limitantes a la hora de acceso al polígono, ya que al tratarse de una zona urbana la accesibilidad limita la toma de muestras.
3. Primeramente, se trazaron los polígonos en el programa Qgis en base a la ciudad y la zona a analizar. Seguido a esto, se revisó el clima para identificar el momento idóneo para operar los vuelos. A esto se le conoce como la ventana climática de vuelo. Para ello se utilizó la aplicación UAV Forecast, aporta el clima, radiación solar, temperatura, viento y su dirección, ráfagas, precipitación, nubes, visibilidad, satélites visibles y bloqueados. Con esta información el programa genera un resultado, si es bueno o no, para volar. Generalmente el mejor momento para volar, fue por las mañanas, después de las 6am que el sol ya estaba a buena altura y la temperatura era menor a los 30°C. Dado que la investigación se basa en zona de aviación federal, es decir, cerca de aeropuerto, se presentaron restricciones ya que, por seguridad, se encuentra bloqueada la zona. Para poder operar vuelos dentro de este perímetro, se solicitó permiso y se registró en DJI Flysafe. Con esto previamente realizado, se preparó la aeronave y el control de mando, con batería cargada en su totalidad y la calibración del dron. Esto se busca hacerlo antes de estar en sitio porque existen factores como la ventana climática y la temperatura del mismo equipo (dron y su control), ya que este cuenta con un mecanismo de autoprotección, si llega a calentarse por la exposición al sol o uso prolongado, no deja realizar la misión. Continuando, ya en sitio, se acomodó y se asignó el punto de despegue, éste no debe modificarse durante el vuelo porque puede perder precisión. Para este punto son importantes los satélites a los que se conecta el GPS de la aeronave. Ya en posición, se enciende el equipo, se le dan los permisos y se carga la misión en el programa que se esté utilizando para lanzar el vuelo, en este caso se utilizó Pix4D. Ya con la información cargada en el programa, revisa automáticamente una lista de requisitos, si seguimos los pasos anteriores,

se pone como aciertos cada uno de los puntos de la lista y está listo para lanzar la misión. Si falta cualquier paso antes mencionado el vuelo no se podrá llevar a cabo.

Fué muy importante revisar el equipo antes de cada misión para evitar demoras e información incompleta.

Cada polígono de muestra requirió dos misiones de vuelos y por cada misión una batería en un tiempo estimado de vuelo de 10 a 15 minutos, con una altura de 120m y distancias menores a 300m. Aunque los alcances del dron son de 500m, se buscó asignar los puntos de despegue cercano al centro de cada misión, para evitar la pérdida de señal con el mando de control.

BITACORA DE VUELOS											
FECHA CREACION	POLIGONO		MISIONES	VUELO		HORA am		TIEMPO min		DEMORA	OBSERVACIONES
	NUM	NOMBRE		1	2	1	2	1	2		
Abril 3,2022	141	141	2	Abril 4,2022		0.47	0.51				Fue el vuelo de aprendizaje
Abril 8,2022	106	106	2	Abril 13,2022	Mayo 7,2022	0.35	0.37	11	11	SI	Se tuvo que repetir la toma por tamaño de poligono
Abril 8,2022		118	2	Abril 8,2022	Mayo 5,2022	0.38	0.4			SI	Se tuvo que repetir la toma por angulo de camara
Abril 8,2022	163	163	2	Abril 14,2022		0.39	0.44			NO	Vuelo exitoso
Abril 15,2022	99	99	2	Abril 17,2022		0.39	0.42			NO	Vuelo exitoso
Abril 15,2022		134	2	Abril 15,2022		0.41	0.44			NO	Vuelo exitoso
Abril 16,2022	73	73	2	Abril 16,2022		0.37	0.4			NO	Vuelo exitoso
Abril 18,2022		99	2	Abril 18,2022	Abril 20,2022	0.45	0.37			SI	Se pospuso una mision por ventana climatica
Abril 18,2022	213	213	2	Abril 22,2022		0.33				SI	Se pospuso el segundo vuelo por dificultad para accesar a la ubicación de traslape para la segunda mision
Abril 18,2022		199	2								
Abril 18,2022		160	2	Abril 15,2022	Abril 24,2022	0.46	0.33			SI	Se porpuso la toma por calentamiento de aeronave
Abril 25,2022	186	186	2	Abril 26,2022		0.37	0.39			NO	Vuelo exitoso
Abril 25,2022	128	128	2	Abril 25,2022	Abril 26,2022	0.41	0.35			SI	Se porpuso la toma por calentamiento de aeronave
TOTAL			26								

Anexo 2: Métodos de análisis de la expansión urbana de la ciudad.

Al tener datos mensuales del crecimiento en metros cuadrados (m^2) por regiones en el perímetro de una ciudad, se pueden realizar varios análisis estadísticos para comprender y evaluar el crecimiento urbano. Aquí hay algunos ejemplos:

- **Análisis descriptivo:**

Calcular medidas de tendencia central, como la media, la mediana y la moda, para obtener una idea de la cantidad promedio de crecimiento en cada región.

Determinar medidas de dispersión, como la desviación estándar o el rango intercuartil, para evaluar qué tan variados son los valores de crecimiento entre las regiones.

Graficar histogramas para visualizar la distribución de los datos de crecimiento en cada región y detectar posibles patrones o asimetrías.

- **Análisis de tendencias:**

Aplicar técnicas de análisis de series temporales, como suavizamiento exponencial o modelos ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average), para identificar tendencias y patrones de crecimiento en cada región a lo largo del tiempo.

Calcular tasas de crecimiento mensual o anual para comprender la velocidad de expansión en cada región y detectar posibles aceleraciones o desaceleraciones en el crecimiento.

- **Análisis comparativo:**

Realizar comparaciones entre las diferentes regiones para identificar aquellas con mayor y menor crecimiento promedio.

Aplicar pruebas estadísticas, como el análisis de varianza (ANOVA) o la prueba de Kruskal-Wallis, para determinar si existen diferencias significativas en el crecimiento entre las regiones.

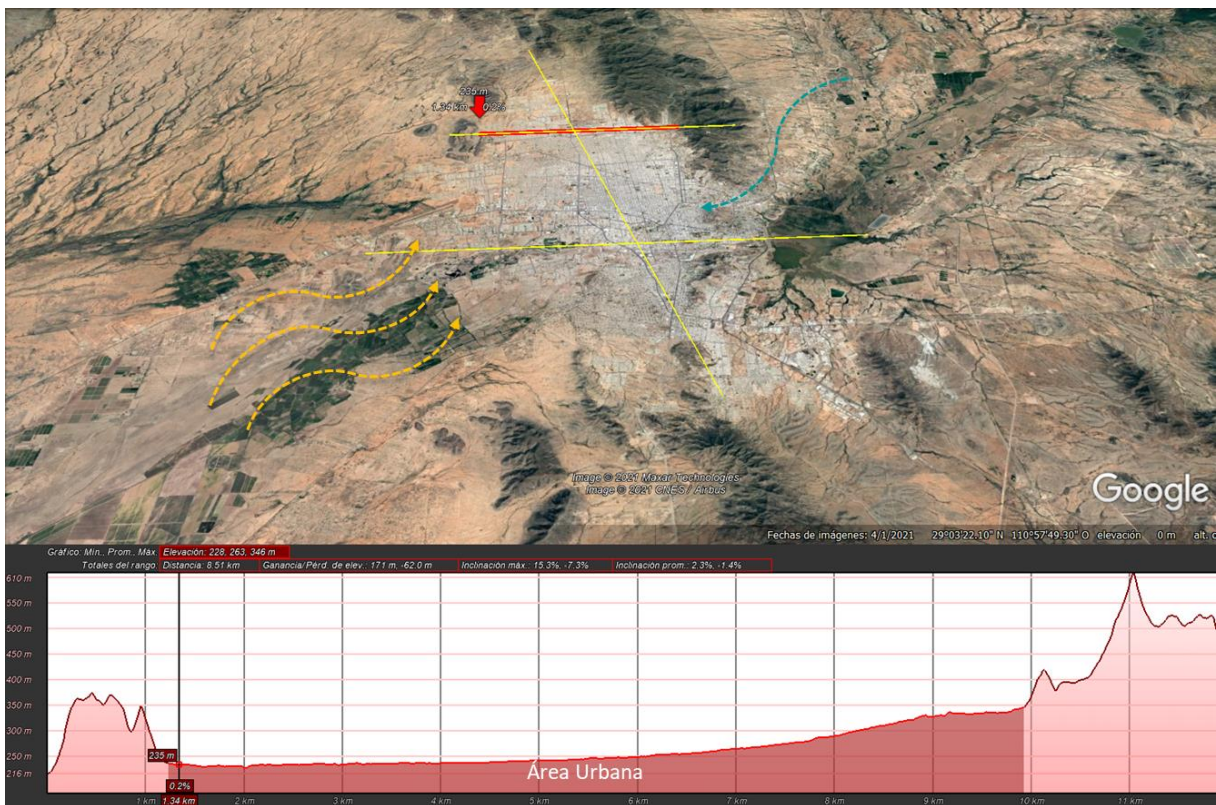
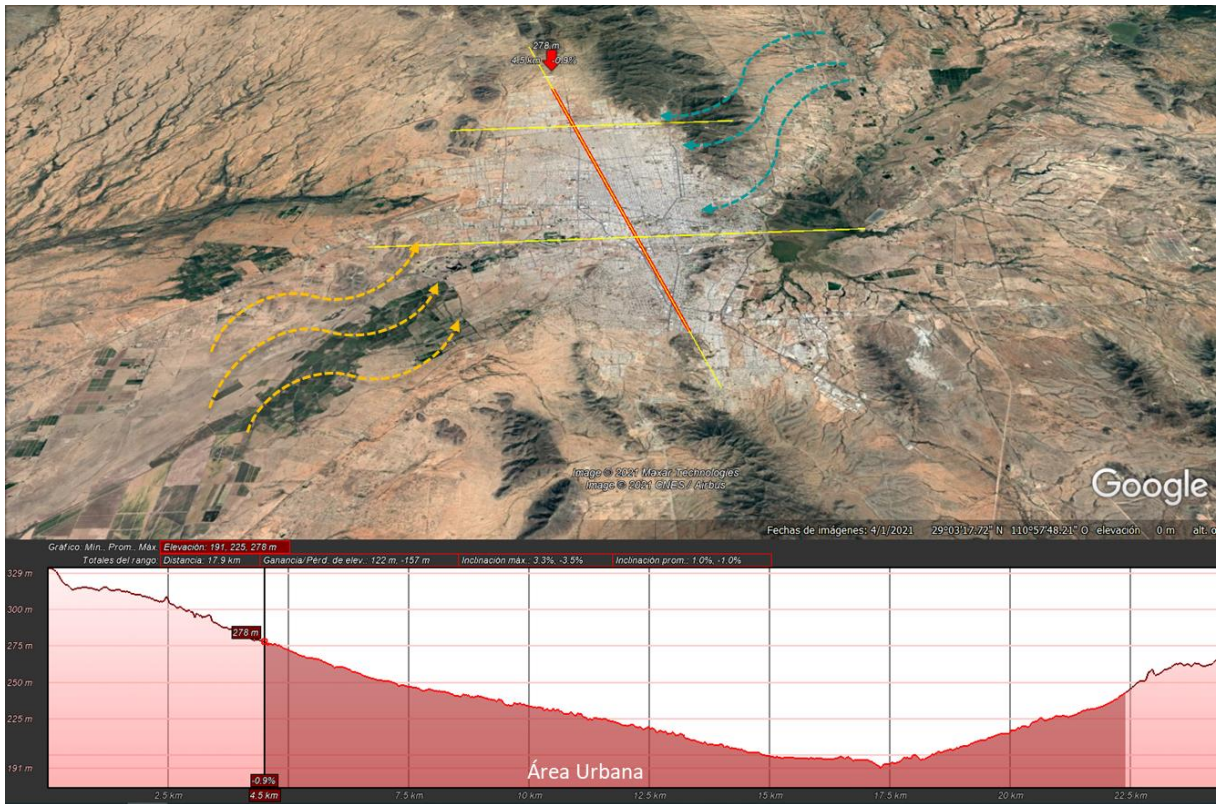
Utilizar gráficos de caja y bigotes (boxplots) para visualizar las diferencias en la distribución del crecimiento entre las regiones y detectar valores atípicos.

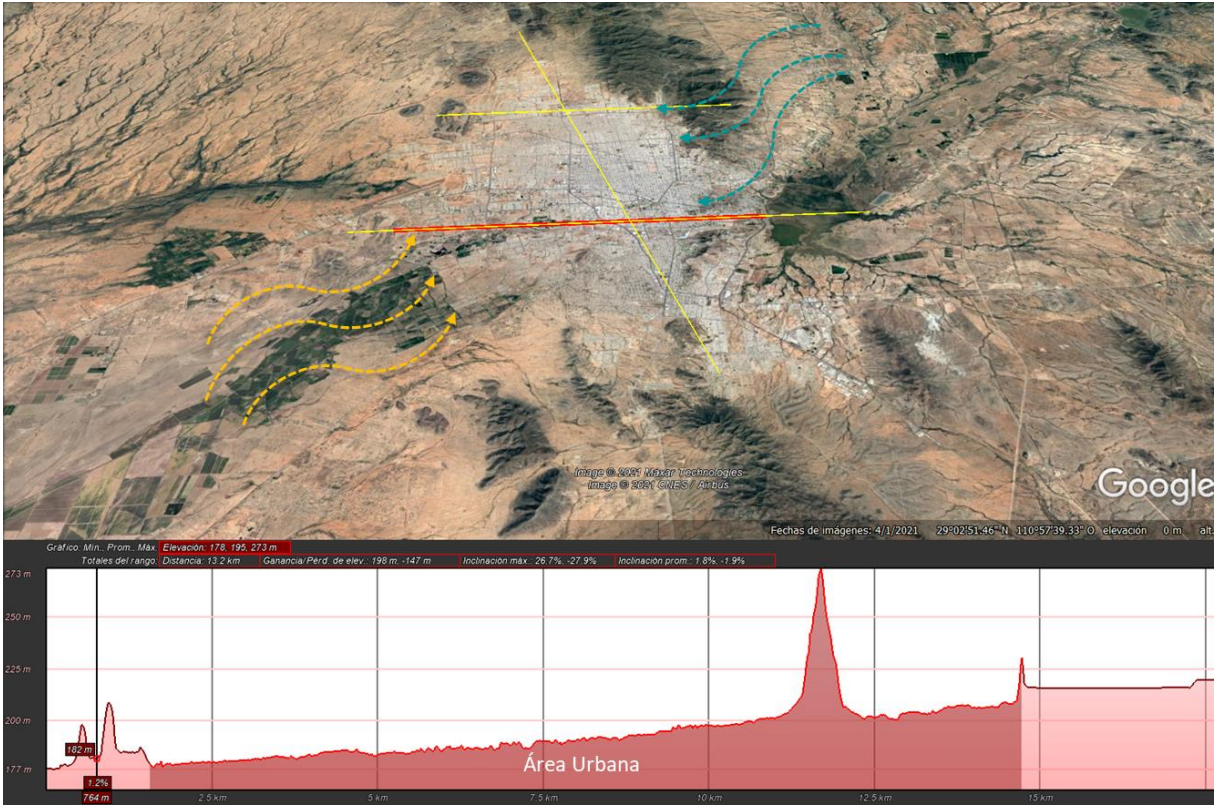
- Análisis espacial:

Utilizar técnicas de análisis espacial, como la interpolación espacial o el análisis de clústeres, para identificar patrones espaciales en el crecimiento de las diferentes regiones y detectar áreas con altos o bajos niveles de expansión.

Calcular índices de concentración espacial, como el índice de Moran, para evaluar si existe autocorrelación espacial en el crecimiento, es decir, si las regiones con altos niveles de crecimiento están cercanas entre sí.

Anexo 3. Perfil de elevaciones.





Anexo 4: Predicción por muestra de temperatura y PM10

<i>Muestra</i>	<i>Longitud</i>	<i>Latitud</i>	<i>x.urban</i>	<i>x.veget</i>	<i>Mes</i>	<i>PM10</i>	<i>Temp</i>
106	-111.0458	29.07503	0.16	0.05	Enero	40.50	17.28
118	-111.0403	29.07236	0.10	0.04	Enero	46.26	17.31
128	-111.0348	29.08619	0.50	0.02	Enero	55.69	17.52
134	-111.0294	29.11567	0.35	0.03	Enero	48.92	17.44
141	-111.0295	29.07891	0.69	0.03	Enero	36.54	17.23
163	-111.019	29.08878	0.73	0.06	Enero	32.93	17.10
178	-111.0151	29.07564	0.43	0.03	Enero	48.95	17.36
186	-111.0117	29.09199	0.95	0.08	Enero	44.40	17.36
67	-111.0617	29.08835	0.19	0.03	Enero	42.70	17.32
73	-111.0564	29.12392	0.73	0.09	Enero	47.83	17.30
99	-111.0458	29.11295	0.83	0.05	Enero	43.38	17.17
106	-111.0458	29.07503	0.16	0.05	Agosto	17.07	32.55
118	-111.0403	29.07236	0.10	0.04	Agosto	19.50	32.58
128	-111.0348	29.08619	0.50	0.02	Agosto	23.48	32.79

134	-111.0294	29.11567	0.35	0.03	Agosto	20.62	32.71
141	-111.0295	29.07891	0.69	0.03	Agosto	15.41	32.50
163	-111.019	29.08878	0.73	0.06	Agosto	13.88	32.37
178	-111.0151	29.07564	0.43	0.03	Agosto	20.64	32.63
186	-111.0117	29.09199	0.95	0.08	Agosto	18.72	32.63
67	-111.0617	29.08835	0.19	0.03	Agosto	18.00	32.59
73	-111.0564	29.12392	0.73	0.09	Agosto	20.17	32.57
99	-111.0458	29.11295	0.83	0.05	Agosto	18.29	32.44

Anexo 5: Consulta de las Unidades Económicas de la zona poniente en DENU.

No. UE	Actividad Económica.
4	Beneficio de productos agrícolas
4	Camaronicultura
2	Captación, tratamiento y suministro de agua realizados por el sector público
7	Construcción de carreteras, puentes y similares
2	Construcción de obras de Generación y conducción de energía eléctrica
7	Construcción de obras de urbanización
1	Construcción de sistemas de distribución de petróleo y gas
5	Edificación de inmuebles comerciales y de servicios, excepto la Supervisión
3	Edificación de naves y plantas industriales, excepto la Supervisión
14	Edificación de vivienda unifamiliar
3	Fabricación de artículos de alfarería, porcelana y loza
2	Fabricación de cemento y productos a base de cemento en plantas integradas
7	Fabricación de concreto
41	Fabricación de ladrillos no refractarios

1	Fabricación de otros productos de hierro y acero
11	Fabricación de productos a base de piedras de cantera
5	Fabricación de productos preesforzados de concreto
2	Fabricación de tubos y bloques de cemento y concreto
2	Generación de electricidad a partir de combustibles fósiles
1	Industria básica del aluminio
4	Instalaciones de sistemas centrales de aire acondicionado y calefacción
5	Instalaciones eléctricas en construcciones
2	Instalación de señalamientos y protecciones en obras viales
2	Minería de arena y grava para la Construcción
1	Minería de oro
17	Otros servicios relacionados
4	Preparación de terrenos para la Construcción
2	Supervisión de Edificación residencial
2	Trabajos de pintura y otros cubrimientos de paredes
1	Transmisión de energía eléctrica

Anexo 6: Tablas de Resultados

Tabla. Temperaturas máximas (Tmax), mínimas (Tmin) y promedios (Tprom) y Precipitación de 1966–2020 (54 años) en Hermosillo.

<i>Mes</i>	<i>Tmax</i>	<i>Tmin.</i>	<i>Tprom.</i>	<i>Precipitación</i>
<i>Ene</i>	30.37	4.47	17.40	15.89
<i>Feb</i>	32.46	5.79	19.14	14.78
<i>Mar</i>	35.38	7.88	21.69	6.94
<i>Abr</i>	37.97	10.75	24.41	3.11
<i>May</i>	41.29	13.90	27.12	3.06
<i>Jun</i>	43.96	19.08	30.97	7.49
<i>Jul</i>	43.70	21.25	31.91	96.15
<i>Ago</i>	42.92	21.05	31.42	93.10
<i>Sep</i>	41.96	20.19	30.53	68.37
<i>Oct</i>	39.25	13.82	26.09	15.54
<i>Nov</i>	35.07	8.09	21.24	16.84
<i>Dic</i>	30.30	4.50	17.37	22.23
<i>Total</i>	<i>37.887</i>	<i>12.565</i>	<i>24.941</i>	<i>363.504</i>

Fuente: Estación meteorológica 26-139 Hermosillo II de CONAGUA.

Tabla. Poniente. Promedios (T_{prom}), máximos (T_{max}) y mínimos (T_{min}) de temperatura mensuales.

<i>Año</i>	<i>Mes</i>	<i>T_{prom}</i>	<i>T_{max}</i>	<i>T_{min}</i>
2021	Octubre	26.39	30.13	22.92
	Noviembre	24.34	31.41	20.50
	Diciembre	21.36	23.97	19.30
2022	Enero	20.05	21.60	18.70
	Febrero	17.60	33.00	5.70
	Marzo	20.38	37.10	7.00
	Abril	25.95	41.80	11.40
	Mayo	28.50	41.80	15.30
	Junio	32.39	45.30	12.90
	Julio	32.84	44.20	20.90
	Agosto	30.51	41.60	22.70
	Septiembre	30.37	45.70	19.90
	Octubre	25.59	38.20	12.20
	Noviembre	18.47	31.60	8.00
	Diciembre	16.90	32.90	4.30
Total		24.78	45.70	4.30

Fuente: Estación de monitoreo Ambient Weather 2000 instalada en Poniente

Tabla. Norponiente. Promedios (T_{prom}), máximos (T_{max}) y mínimos (T_{min}) mensuales.

<i>Año</i>	<i>Mes</i>	<i>T_{prom}</i>	<i>T_{max}</i>	<i>T_{min}</i>
2022	Marzo	22.47	35.80	8.80
	Abril	24.92	40.40	10.80
	Mayo	27.78	40.70	14.80
	Junio	31.80	43.60	20.90
	Julio	32.15	43.80	21.50
	Agosto	29.84	40.80	21.90
	Septiembre	29.51	41.10	20.40
	Octubre	24.85	36.50	11.70
	Noviembre	18.13	30.00	7.10
	Diciembre	16.65	31.70	3.70
Total		25.98	43.80	3.70

Fuente: Estación de monitoreo Ambient Weather 2000 instalada en Norponiente

Tabla. Poniente. Promedio (Prom.Hum), máximos (Max.Hum) y mínimos (Min.Hum) mensuales de Humedad y precipitación.

Año	Mes	Prom.Hum (%)	Max.Hum (%)	Min.Hum (%)	Precipitación (mm)
2021	Octubre	39.53	72.13	22.30	0
	Noviembre	39.35	51.34	18.14	0
	Diciembre	51.10	70.03	41.90	0
2022	Enero	55.18	66.77	43.02	0
	Febrero	33.31	77.00	4.00	0.3
	Marzo	25.84	78.00	3.00	0
	Abril	27.73	80.00	1.00	0
	Mayo	27.88	97.00	2.00	0
	Junio	41.24	91.00	11.00	43.2
	Julio	51.90	99.00	17.00	149.3
	Agosto	67.22	98.00	28.00	218.8
	Septiembre	59.78	98.00	14.00	72.4
	Octubre	52.15	96.00	12.00	12.2
	Noviembre	43.91	89.00	10.00	0
	Diciembre	48.00	99.00	11.00	8
Total		44.79	99.00	1.00	504.2

Fuente: Estación de monitoreo Ambient Weather 2000 instalada en Poniente

Tabla. Norponiente. Promedio (Prom.Hum), máximos (Max.Hum) y mínimos (Min.Hum) mensuales de Humedad y lluvias

Año	Mes	Prom.Hum (%)	Max.Hum (%)	Min.Hum (%)	Lluvia (mm)
2022	Marzo	23.83	74.00	4.00	0.00
	Abril	28.63	81.00	1.00	0.00
	Mayo	26.30	83.00	2.00	0.00
	Junio	39.43	95.00	11.00	33.10
	Julio	49.48	95.00	15.00	59.70
	Agosto	65.19	99.00	27.00	162.10
	Septiembre	59.03	99.00	15.00	51.90
	Octubre	51.26	96.00	12.00	43.60
	Noviembre	41.97	90.00	11.00	0.00
	Diciembre	45.26	96.00	9.00	0.00
	Total		44.35	99.00	1.00

Fuente: Estación de monitoreo Ambient Weather 2000 instalada en Norponiente.

Tabla. Poniente. Dirección, frecuencia, ráfagas y velocidad del viento mensual. E= Este, S=Sur, N=Norte, O=Oeste.

<i>Mes</i>	<i>Dir.Viento.</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>Ráfagas</i>	<i>Velocidad</i>
Febrero	E	1	6.8	3.02
	ESE	5	4.91	1.58
	N	1	3.47	1.42
	NE	2	6.92	3.07
	S	2	8.95	3.18
	SSE	1	5.53	2.80
	SSO	1	8.99	4.50
	SO	6	7.51	2.35
	O	3	8.98	3.17
	OSO	1	5.35	2.64
Marzo	E	2	5.52	2.01
	NE	2	10.29	4.55
	NO	2	6.54	2.84
	S	2	6.17	2.83
	SSE	1	4.64	2.27
	SSO	2	10.3	4.03
	SO	8	8.59	2.89
	O	2	10.4	3.31
	OSO	2	7.66	3.11
Abril	E	2	10.04	4.59
	N	1	9.22	4.56
	S	2	5.79	2.93
	SE	1	6.38	3.23
	SSO	3	9	3.39
	SO	10	10.47	3.80
	O	2	6.94	3.41
	ONO	1	6.25	3.25
	OSO	2	6.84	3.12
	Mayo	E	1	10.77
SSO		5	8.54	3.52
SO		17	10.53	4.09
O		1	7.44	3.73
OSO		7	10.04	4.12
Junio	ENE	1	8.73	4.19
	SE	1	8.28	4.20
	SO	21	12.05	4.60

	OSO	1	8.59	4.42
Julio	E	1	8.87	4.40
	N	1	9.29	4.91
	S	2	10.71	4.43
	SE	4	11	4.31
	SSE	5	10.26	3.28
	SSO	13	8.55	3.40
	SO	5	10.06	4.24
Agosto	E	14	7.26	2.43
	ESE	5	7.22	2.74
	N	2	5.56	2.06
	SE	1	6.56	3.06
	SSE	2	5.88	2.74
	SSO	6	8.05	2.85
	SO	1	5.21	2.44
Septiembre	E	2	5.46	2.19
	ESE	12	9.98	2.45
	NNO	3	5.25	1.35
	S	3	7.48	3.19
	SE	2	5.4	2.24
	SSE	7	11.28	3.27
	SSO	1	6.09	3.15
Octubre	ESE	12	6.37	2.06
	SE	19	7.1	1.96
Noviembre	ESE	22	6.45	1.58
	NE	1	1.74	1.19
	SE	7	8.06	2.43
Diciembre	ESE	19	2.61	1.17
	SE	12	3.62	1.33
Total		309	12.05	2.84

Fuente: Estación de monitoreo Ambient Weather 2000 instalada en Poniente

Tabla. Norponiente. Dirección, frecuencia, ráfagas y velocidad del viento por mes.

<i>Mes</i>	<i>Dir. Viento.</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>Ráfagas</i>	<i>Velocidad</i>
Marzo	N	3	6.5	2.77
	NE	3	5.5	2.50
	NNE	3	12.4	4.57
	NNO	2	10.3	3.95
	NO	1	10.2	4.90
Abril	N	26	10.5	3.37
	NE	1	6.1	3.00
	NNE	2	11.5	5.50
	NNO	1	5.8	2.80
Mayo	N	26	10.3	3.83
	NE	1	8.4	4.20
	NNE	3	10.7	4.47
Junio	N	17	10.5	4.42
	NE	2	12.9	6.05
	NNE	11	11.2	4.55
Julio	N	9	10.5	4.28
	NNE	20	12.2	4.05
Agosto	N	10	7.3	2.95
	NNE	21	8.8	3.02
Septiembre	N	8	12	3.00
	NNE	22	12.8	3.02
Octubre	N	2	4.7	1.95
	NNE	29	9.3	2.06
Noviembre	N	5	9	2.44
	NNE	25	16.2	2.13
Diciembre	N	12	4.7	1.33
	NNE	19	6.9	1.31
Total		284	16.2	3.08

Fuente: Estación de monitoreo Ambient Weather 2000 instalada en Norponiente.

Tabla. Radiación promedio y máximas mensuales por estación.

<i>Mes</i>	<i>Max/Prom.</i>	<i>Norponiente</i>	<i>Poniente</i>	<i>Total</i>
<i>Febrero</i>	<i>Max</i>		233.71	233.71
	<i>Prom.</i>		179.46	179.46
<i>Marzo</i>	<i>Max</i>	236.5	340.92	340.92
	<i>Prom</i>	216.36	210.97	212.55
<i>Abril</i>	<i>Max</i>	253.9	338.79	338.79
	<i>Prom</i>	243.05	257.82	250.18
<i>Mayo</i>	<i>Max</i>	273.9	311.89	311.89
	<i>Prom</i>	255.28	299.32	277.66
<i>Junio</i>	<i>Max</i>	292.1	415.64	415.64
	<i>Prom</i>	259.03	291.94	274.31
<i>Julio</i>	<i>Max</i>	320.2	370.22	370.22
	<i>Prom</i>	242.99	259.04	251.28
<i>Agosto</i>	<i>Max</i>	353.1	289.66	353.1
	<i>Prom</i>	222.51	230.67	226.59
<i>Septiembre</i>	<i>Max</i>	237.6	259.2	259.2
	<i>Prom</i>	191.54	193.95	192.74
<i>Octubre</i>	<i>Max</i>	212	209.02	212
	<i>Prom</i>	172.43	168.85	170.64
<i>Noviembre</i>	<i>Max</i>	157.5	151.34	157.5
	<i>Prom</i>	132.73	127.28	130
<i>Diciembre</i>	<i>Max</i>	133.5	115.21	133.5
	<i>Prom</i>	101.8	93.13	97.47
2022	Total máximo	353.1	415.64	415.64
	Total promedio	202.43	209.57	206.22

Fuente: Estación de monitoreo Ambient Weather 2000 instalada en Poniente y Norponiente.

Tabla. Crecimiento de la Ciudad de Hermosillo, poblacional y urbana del periodo 2016 – 2021.

<i>Año</i>	<i>No. Manzanas</i>	<i>Población total</i>	<i>Área urbana (ha)</i>	<i>Densidad promedio (hab/ha)</i>
2016	13,503	714,318	16,262.49	43.92
2017	13,604	719,031	16,607.62	43.30
2018	13,796	722,838	16,818.54	42.98
2019	14,848	851,146	17,227.00	49.41
2020	14,945	852,541	17,425.97	48.92
2021	15,160	854,954	17,654.04	48.43

Fuente: CENSO de población y vivienda de INEGI 2010 y 2020, resultados por AGEB y manzana urbana.

Tabla. Crecimiento durante el periodo 2016 – 2022 de los polígonos muestra (hectáreas).

<i>Muestra</i>	<i>2016</i>	<i>2017</i>	<i>2018</i>	<i>2019</i>	<i>2020</i>	<i>2021</i>	<i>2022</i>	<i>Total</i>
<i>P178</i>	2.34	2.55	2.55	2.55	2.55	2.55	2.55	17.63
<i>P73</i>	3.78	0.13	2.94	1.52	0.37	1.87	3.35	13.96
<i>P106</i>	0.01	3.17	0.00	1.87	0.00	0.00	3.24	8.29
<i>P186</i>	7.30	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	7.34
<i>P141</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.26	3.17	3.17	6.61
<i>P163</i>	0.00	0.00	0.00	1.04	1.04	1.04	1.04	4.17
<i>P118</i>	0.08	0.00	0.00	0.00	0.82	0.00	0.50	1.41
<i>P99</i>	0.21	0.22	0.34	0.31	0.16	0.00	0.00	1.24
<i>P128</i>	1.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.11
<i>P134</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>P67</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	14.82	6.07	5.82	7.33	5.21	8.64	13.86	61.75

Fuente: Elaboración propia.

Tabla. Cobertura arbórea anual por muestra (hectáreas)2016 -2022.

Muestra	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	%Cob.M.
<i>P67</i>	0.82	0.86	0.91	0.96	1.01	1.06	1.11	3.57%
<i>P73</i>	3.97	3.56	3.15	2.74	2.34	1.93	1.52	4.89%
<i>P99</i>	0.98	1.17	1.36	1.55	1.74	1.93	2.12	6.80%
<i>P106</i>	1.56	1.55	1.54	1.53	1.52	1.50	1.49	4.79%
<i>P118</i>	1.30	1.31	1.32	1.33	1.34	1.35	1.36	4.37%
<i>P128</i>	0.51	0.61	0.71	0.81	0.91	1.01	1.11	3.57%
<i>P134</i>	0.67	0.80	0.93	1.06	1.20	1.33	1.46	4.67%
<i>P141</i>	0.75	0.87	1.00	1.13	1.26	1.38	1.51	4.84%
<i>P163</i>	1.58	1.76	1.93	2.10	2.27	2.44	2.61	8.37%
<i>P178</i>	0.82	0.92	1.02	1.12	1.22	1.32	1.42	4.54%
<i>P186</i>	1.93	2.13	2.34	2.55	2.76	2.96	3.17	10.17%

“Muestra” corresponde al polígono censado, “%Cob.M.” representa al porcentaje total cubierto por arboles por muestra, calculado a partir de la superficie total del polígono (31.18 ha).

Fuente: Elaboración propia

Anexo 7: Gráficas.

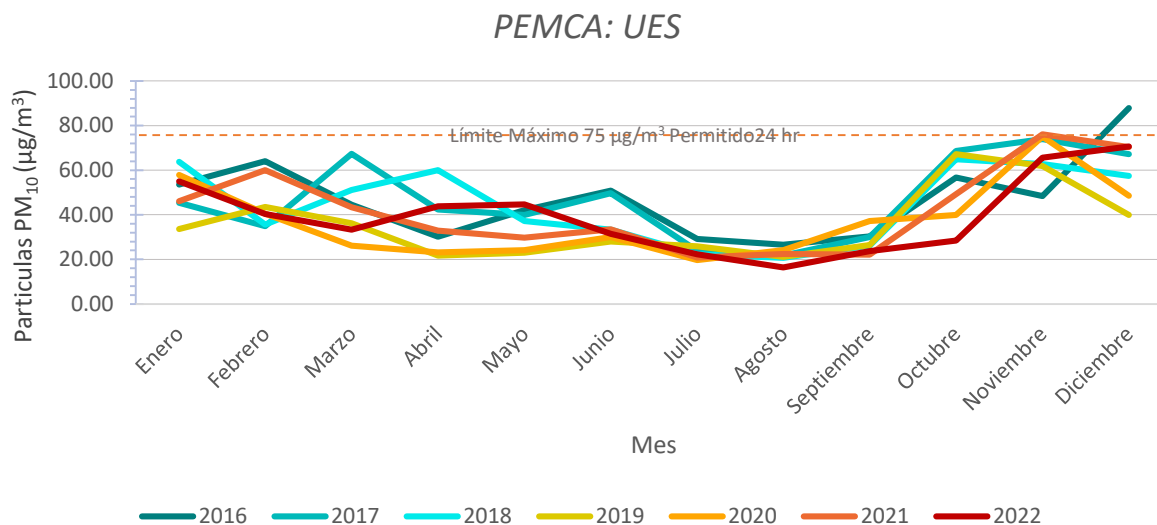


Figura. Estación UES. Promedios mensuales 2016-2022.

La grafica muestra el comportamiento mensual del periodo, las barras representan el promedio que se registró durante el año del periodo, donde los años 2016, 2017 y 2018 son representados de color cian de oscuro a claro, el año 2019 es representado en las barras de color amarillo, y los años 2020, 2021 y 2022 son representados por las barras color naranja de claro a oscuro, la línea punteada marca el límite permisible. Fuente: elaboración propia con datos provenientes de las estaciones PEMCA.

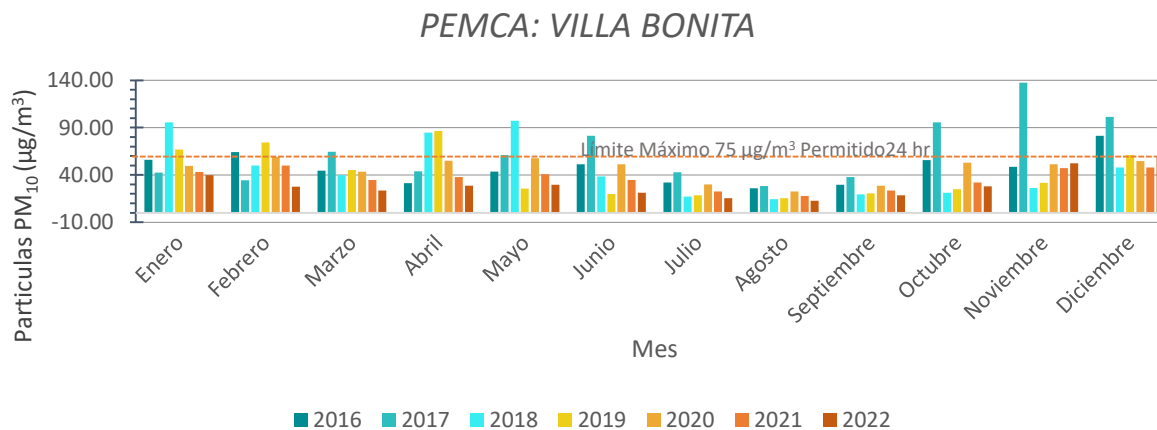


Figura. Estación Villa Bonita. Promedios mensuales de PM₁₀ durante el periodo 2016 – 2022.

La grafica muestra el comportamiento mensual del periodo, las barras representan el promedio que se registró durante el año del periodo, donde los años 2016, 2017 y 2018 son representados de color cian de oscuro a claro, el año 2019 es representado en las barras de color amarillo, y los años 2020, 2021 y 2022 son representados por las barras color naranja de claro a oscuro, la

línea punteada marca el límite permisible. Fuente: elaboración propia con datos provenientes de las estaciones PEMCA.

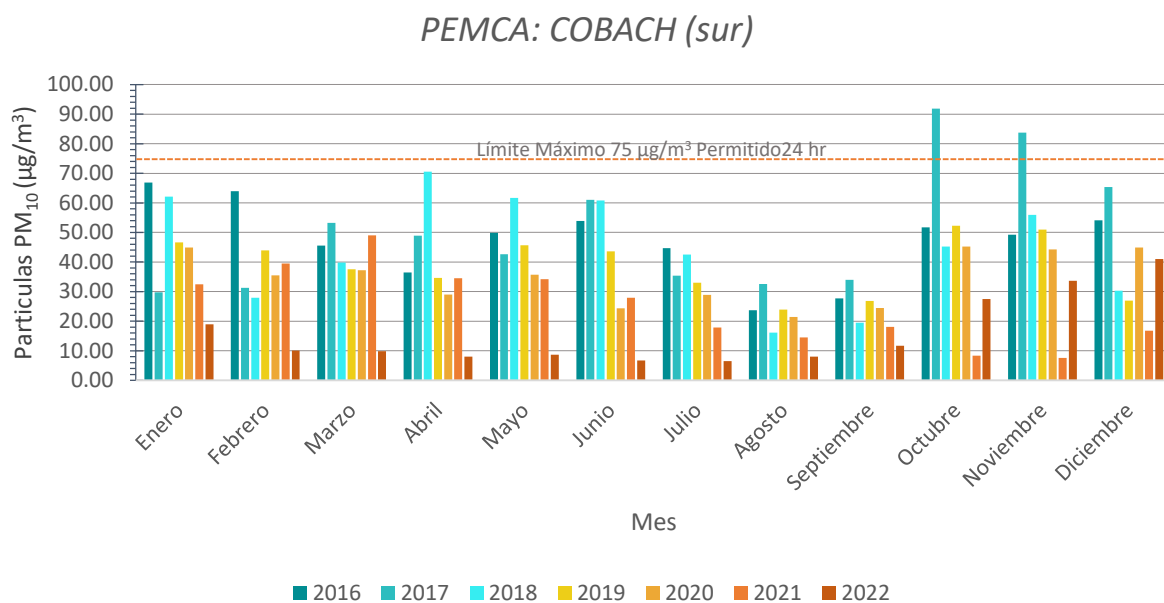


Figura. Estación COBACH. Promedios mensuales de PM₁₀ 2016-2022.

La grafica muestra el comportamiento mensual del periodo, las barras representan el promedio que se registró durante el año del periodo, donde los años 2016, 2017 y 2018 son representados de color cian de oscuro a claro, el año 2019 es representado en las barras de color amarillo, y los años 2020, 2021 y 2022 son representados por las barras color naranja de claro a oscuro, la línea punteada marca el límite permisible. Fuente: elaboración propia con datos provenientes de las estaciones PEMCA.