

# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTAD DE INGENIERÍA, FACULTAD DEL HÁBITAT Y FACULTAD DE  
CIENCIAS SOCIALES Y HUMANIDADES  
MAESTRÍA INTERDISCIPLINARIA EN CIUDADES SOSTENIBLES

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE

## MAESTRÍA EN CIUDADES SOSTENIBLES

MANEJO DE CUENCAS ATMOSFÉRICAS Y EVALUACIÓN DE DIÓXIDO DE  
NITRÓGENO (NO<sub>2</sub>) CON RELACIÓN A LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN EL  
VALLE DE SAN LUIS POTOSÍ A PARTIR DEL ANÁLISIS ESPACIAL

PRESENTA:

**ING. ALDO GARCÍA MUÑOZ**

### COMITÉ TUTORIAL:

**DIRECTOR:** DR. ABRAHAM CÁRDENAS TRISTÁN

**CODIRECTOR:** DR. DAVID ENRIQUE FLORES JIMÉNEZ

**ASESOR:** DR. MARCOS ALGARA SILLER

**ASESOR:** DR. CARLOS RENATO RAMOS PALACIOS

### SINODALES:

**PRESIDENTE:** DR. MARCOS ALGARA SILLER

**SECRETARIO:** JIMÉNEZ DR. ABRAHAM CÁRDENAS TRISTÁN

**VOCAL:** DR. DAVID ENRIQUE FLORES

**VOCAL:** DR. CARLOS RENATO RAMOS PALACIOS

## **CRÉDITOS INSTITUCIONALES**

PROYECTO REALIZADO EN:

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ**

**AGRADEZCO A SECIHTI EL OTORGAMIENTO DE LA BECA-TESIS**

**Becario No. 1101870**

**MAESTRÍA EN CIUDADES SOSTENIBLES RECIBE APOYO ATRAVÉS DEL  
PROGRAMA NACIONAL DE POSGRADOS DE CALIDAD (PNPC).**



MANEJO DE CUENCAS ATMOSFÉRICAS Y EVALUACIÓN DE DIÓXIDO DE NITRÓGENO (NO<sub>2</sub>) CON RELACIÓN A LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN EL VALLE DE SAN LUIS POTOSÍ A PARTIR DEL ANÁLISIS ESPACIAL © 2025 de Aldo García Muñoz <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0> Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International.

## **DEDICATORIA**

Este trabajo está dedicado a toda mi familia, a mi madre por su constante apoyo, esfuerzo y amor incondicional, a mis hermanos que con sus palabras de aliento y compañía me ayudaron a superar cada obstáculo y en especial a mi hijo que ha sido mi motor en todo momento y mi más grande inspiración para seguir adelante.

## AGRADECIMIENTOS

A la **Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP)** y a la **Agenda Ambiental**, por brindarme las herramientas necesarias para realizar este proyecto, así como a mis docentes, quienes con su experiencia, dedicación y vocación orientaron cada paso en esta investigación.

A la **Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI)** por el apoyo económico y la confianza otorgada en mí al permitirme ser su becario durante mi estancia en el posgrado.

Al **Dr. Abraham Cárdenas Tristán** y al **Dr. David Enrique Flores Jiménez** por todo el apoyo brindado en la dirección de esta tesis, su guía, experiencia y conocimientos fueron fundamentales para lograr los resultados aquí presentados.

Al **Dr. Marco Algara Siller** y al **Dr. Carlos Renato Ramos Palacios** por su dedicación, orientación y valiosas observaciones que contribuyeron al enriquecimiento de esta investigación.

Al **Dr. José Antonio Avalos Lozano** por el apoyo brindado y la confianza depositada en mí durante esta etapa académica.

A mis compañeros **Luis Galván**, **Juan José Silva** y **Saul Jiménez**, por cada consejo y por compartir su tiempo y conocimientos conmigo a lo largo de este proceso.

A mi **familia** y **amigos**, ya que este trabajo no habría sido posible sin su respaldo, su apoyo incondicional y por impulsarme a nunca rendirme.

A **Alma Judith**, por su compañía, comprensión y paciencia ya que siempre tuvo palabras de ánimo en los momentos difíciles.

A **Dios**, por guiar mis pasos, darme la fortaleza y salud para culminar este proyecto.

A todos los que hicieron posible este proyecto. Este logro no es solo mío, sino también de quienes me acompañaron en cada paso.

## ÍNDICE

|  |           |
|--|-----------|
| <b>RESUMEN</b> .....   | <b>12</b> |
| <b>ABSTRACT</b> .....  | <b>13</b> |
| <b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....   | <b>14</b> |
| 1.1 Título.....  | 14        |
| 1.2 Antecedentes .....   | 14        |
| 1.3 Enunciado del problema.....  | 15        |
| 1.4 Preguntas de investigación.....  | 16        |
| 1.5 Justificación .....  | 16        |
| 1.6 Objetivo General .....   | 17        |
| 1.7 Objetivos específicos.....   | 17        |
| 1.8 Marco conceptual. ....   | 17        |
| 1.9 Hipótesis.....   | 19        |
| 1.10 Diseño metodológico y técnicas de investigación .....   | 19        |
| <b>2. CAPÍTULO 1. CARACTERIZACIÓN DE CUENCAS ATMOSFÉRICAS Y DISTRIBUCIÓN DE DIÓXIDO DE NITRÓGENO EN EL VALLE DE SAN LUIS POTOSÍ.</b> .....   | <b>22</b> |
| 2.1 Zona de estudio .....  | 22        |
| 2.2 Clima.....   | 22        |
| 2.3 Hidrología .....   | 23        |
| 2.4 Marco Jurídico .....   | 24        |
| 2.5 Cuencas atmosféricas en el VSLP.....   | 26        |
| 2.5.1 Cuenca atmosférica .....   | 26        |
| 2.4.2 Distribución de Dióxido de Nitrógeno (NO <sub>2</sub> ) en el VSLP.....  | 28        |
| 2.4.3 Insumos y caracterización de las cuencas atmosféricas .....  | 32        |
| 2.4.4 Cuencas atmosféricas de fechas con mayor concentración de NO <sub>2</sub> .....  | 37        |
| <b>3. CAPÍTULO 2. CORRELACIÓN DE PEARSON DE DATOS SATELITALES DEL SENSOR REMOTO SENTINEL-5P Y ESTACIONES TERRESTRES DE MONITOREO DE CALIDAD DEL AIRE (SEGAM).</b> .....  | <b>41</b> |
| 3.1 Correlación de Pearson de NO <sub>2</sub> del Sensor Sentinel-5P y NO <sub>2</sub> de las estaciones de monitoreo de calidad del aire de la SEGAM registrado a las 13 horas en la semana de invierno 2019. 43  | 43        |
| 3.2 Correlación de Pearson de NO <sub>2</sub> del Sensor Sentinel-5P y NO <sub>2</sub> de las estaciones de monitoreo de calidad del aire de la SEGAM registrado a las 13 horas en la semana de primavera 2020. 45 | 45        |
| 3.3 Correlación de Pearson de NO <sub>2</sub> del Sensor Sentinel-5P y NO <sub>2</sub> de las estaciones de monitoreo de calidad del aire de la SEGAM registrado a las 13 horas en la semana de verano 2020. 47    | 47        |

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| 3.4       | Correlación de Pearson de NO <sub>2</sub> del Sensor Sentinel-5P y NO <sub>2</sub> de las estaciones de monitoreo de calidad del aire de la SEGAM registrado a las 13 horas en la semana de otoño 2021.      | 48        |
| 3.5       | Correlación de Pearson entre NO <sub>2</sub> y las variables climáticas disponibles en las estaciones de monitoreo de calidad del aire de la SEGAM registrado a las 13 horas en la semana de invierno 2019.  | 51        |
| 3.6       | Correlación de Pearson entre NO <sub>2</sub> y las variables climáticas disponibles en las estaciones de monitoreo de calidad del aire de la SEGAM registrado a las 13 horas en la semana de primavera 2020. | 55        |
| 3.7       | Correlación de Pearson entre NO <sub>2</sub> y las variables climáticas disponibles en las estaciones de monitoreo de calidad del aire de la SEGAM registrado a las 13 horas en la semana de verano 2020.    | 58        |
| 3.8       | Correlación de Pearson entre NO <sub>2</sub> y las variables climáticas disponibles en las estaciones de monitoreo de calidad del aire de la SEGAM registrado a las 13 horas en la semana de otoño 2021.     | 62        |
| <b>4.</b> | <b>CAPÍTULO 3. ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE DIÓXIDO DE NITRÓGENO DEL SENSOR REMOTO SENTINEL-5P EN EL VSLP.....</b>   | <b>67</b> |
| 4.1       | Análisis geoestadístico y modelos de interpolación espacial.   | 67        |
| 4.2       | Insumos y análisis exploratorio de los datos.  | 68        |
| 4.3       | Aplicación de método geoestadístico Kriging.....   | 72        |
| 4.4       | Resultados .....   | 74        |
| <b>5.</b> | <b>CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN EL VSLP PARA EL PERIODO 1980-2021.</b>  | <b>78</b> |
| 5.1       | Actividades económicas y cambio de uso de suelo en el VSLP.....  | 78        |
| 5.2       | Insumos y análisis de variabilidad climática .....   | 79        |
| 5.3       | Análisis de diferencia climática de temperatura mínima en el VSLP entre el periodo de (1980-2000) y (2001-2021).....   | 81        |
| 5.4       | Análisis de diferencia climática de temperatura máxima en el VSLP entre el periodo de (1980-2000) y (2001-2021).....   | 82        |
| 5.5       | Análisis de diferencia climática de precipitación en el VSLP entre el periodo de (1980-2000) y (2001-2021).....  | 83        |
| 5.6       | Análisis de diferencia climática de velocidad de viento máxima en el VSLP entre el periodo de (1980-2000) y (2001-2021). .....   | 84        |
| 5.7       | Anomalías climáticas de temperatura mínima en el VSLP de las temporadas del clima de (2020-2021) con respecto al promedio climatológico (1980-2021). .....   | 85        |
| 5.8       | Anomalías climáticas de temperatura máxima en el VSLP de las temporadas del clima de (2020-2021) con respecto al promedio climatológico (1980-2021). .....   | 86        |
| 5.9       | Anomalías climáticas de temperatura media en el VSLP de las temporadas del clima de (2020-2021) con respecto al promedio climatológico (1980-2021). .....  | 87        |
| 5.9       | Anomalías climáticas de precipitación en el VSLP de las temporadas del clima de (2020-2021) con respecto al promedio climatológico (1980-2021). .....  | 88        |

|                              |           |
|------------------------------|-----------|
| <b>6. CONCLUSIONES .....</b> | <b>89</b> |
| <b>7. REFERENCIAS .....</b>  | <b>92</b> |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Metodología utilizada para la caracterización de cuencas atmosféricas en el VSLP.....   | 20 |
| Figura 2. Metodología utilizada para el procesamiento y análisis de correlación de los datos de sensor remoto Sentinel-5P y estaciones terrestres (SEGAM). .....  | 20 |
| Figura 3. Metodología utilizada para el procesamiento y análisis de correlación de las concentraciones de dióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> ) y variables climáticas disponibles por estación. .... | 21 |
| Figura 4. Metodología utilizada para análisis geoestadístico de dióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> ) de sensor remoto Sentinel-5P realizado con método de interpolación (Kriging) .....              | 21 |
| Figura 5. Metodología utilizada para análisis de variabilidad climática con la base de información de Climateengine-ERA-5 .....   | 21 |
| Figura 6 Ubicación de la zona de estudio.....   | 22 |
| Figura 7. Ubicación del VSLP en las cuencas hidrológicas.....   | 23 |
| Figura 8. Ubicación del VSLP en las subcuencas hidrológicas. ....   | 24 |
| Figura 9. Cuenca atmosférica y concentración de NO <sub>2</sub> durante la semana de invierno en 2019. ....   | 34 |
| Figura 10. Cuenca atmosférica y concentración de NO <sub>2</sub> durante la semana de primavera en 2020. ...  | 34 |
| Figura 11. Cuenca atmosférica y concentración de NO <sub>2</sub> durante la semana de verano en 2020. ....  | 35 |
| Figura 12. Cuenca atmosférica y concentración de NO <sub>2</sub> durante la semana de otoño en 2021.....  | 35 |
| Figura 13. Cuenca atmosférica y concentración de NO <sub>2</sub> del 07 de febrero de 2019.....   | 37 |
| Figura 14. Cuenca atmosférica y concentración de NO <sub>2</sub> del 19 de diciembre de 2019.....   | 38 |
| Figura 15. Cuenca atmosférica y concentración de NO <sub>2</sub> del 23 de diciembre de 2019.....   | 39 |
| Figura 16. Cuenca atmosférica y concentración de NO <sub>2</sub> del 06 de enero de 2020. ....  | 39 |
| Figura 17. Cuenca atmosférica y concentración de NO <sub>2</sub> del 10 de noviembre de 2021. ....  | 40 |
| Figura 18. Cuenca atmosférica y concentración de NO <sub>2</sub> del 24 de diciembre de 2021.....   | 41 |
| Figura 19. Interpretación del coeficiente de correlación de Pearson, estimado r. ....   | 42 |
| Figura 20. Correlación de Pearson de NO <sub>2</sub> para la estación IPAC en la semana de invierno.....  | 43 |
| Figura 21. Correlación de Pearson de NO <sub>2</sub> para la estación EPPDM en la semana de invierno.....   | 43 |
| Figura 22. Correlación de Pearson de NO <sub>2</sub> para la estación DIF en la semana de invierno. ....  | 44 |
| Figura 23. Correlación de Pearson de NO <sub>2</sub> para la estación Biblioteca en la semana de invierno.....  | 44 |
| Figura 24. Gráfico de correlación de Pearson de NO <sub>2</sub> para la estación IPAC en la semana de primavera. ....   | 45 |
| Figura 25. Gráfico de correlación de Pearson de NO <sub>2</sub> para la estación EPPDM en la semana de primavera. ....  | 45 |
| Figura 26. Gráfico de correlación de Pearson de NO <sub>2</sub> para la estación DIF en la semana de primavera. ....  | 46 |
| Figura 27. Correlación de Pearson de NO <sub>2</sub> para la estación Biblioteca en la semana de primavera.....   | 46 |
| Figura 28. Correlación de Pearson de NO <sub>2</sub> para la estación IPAC en la semana de verano.....  | 47 |
| Figura 29. Correlación de Pearson de NO <sub>2</sub> para la estación EPPDM en la semana de verano.....   | 47 |
| Figura 30. Correlación de Pearson de NO <sub>2</sub> para la estación DIF en la semana de verano. ....  | 48 |
| Figura 31. Correlación de Pearson de NO <sub>2</sub> para la estación Biblioteca en la semana de verano.....  | 48 |
| Figura 32. Correlación de Pearson de NO <sub>2</sub> para la estación IPAC en la semana de otoño. ....  | 49 |
| Figura 33. Correlación de Pearson de NO <sub>2</sub> para la estación EPPDM en la semana de otoño. ....   | 49 |
| Figura 34. Correlación de Pearson de NO <sub>2</sub> para la estación DIF en la semana de otoño. ....   | 50 |
| Figura 35. Correlación de Pearson de NO <sub>2</sub> para la estación Biblioteca en la semana de otoño. ....  | 50 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 36. Correlación de Pearson de NO <sub>2</sub> y variables climáticas para la estación IPAC en la semana de invierno. ....                                  | 51 |
| Figura 37. Correlación de Pearson de NO <sub>2</sub> y variables climáticas para la estación EPPDM en la semana de invierno. ....                                 | 52 |
| Figura 38. Correlación de Pearson de NO <sub>2</sub> y variables climáticas para la estación DIF en la semana de invierno. ....                                   | 53 |
| Figura 39. Correlación de Pearson de NO <sub>2</sub> y variables climáticas para la estación Biblioteca en la semana de invierno.....                             | 54 |
| Figura 40. Correlación de Pearson de NO <sub>2</sub> y variables climáticas para la estación IPAC en la semana de primavera. ....                                 | 55 |
| Figura 41. Correlación de Pearson de NO <sub>2</sub> y variables climáticas para la estación EPPDM en la semana de primavera. ....                                | 56 |
| Figura 42. Correlación de Pearson de NO <sub>2</sub> y variables climáticas para la estación Biblioteca en la semana de primavera. ....                           | 57 |
| Figura 43. Correlación de Pearson de NO <sub>2</sub> y variables climáticas para la estación IPAC en la semana de verano. ....                                    | 58 |
| Figura 44. Correlación de Pearson de NO <sub>2</sub> y variables climáticas para la estación EPPDM en la semana de verano. ....                                   | 59 |
| Figura 45. Correlación de Pearson de NO <sub>2</sub> y variables climáticas para la estación DIF en la semana de verano. ....                                     | 60 |
| Figura 46. Correlación de Pearson de NO <sub>2</sub> y variables climáticas para la estación Biblioteca en la semana de verano. ....                              | 61 |
| Figura 47. Correlación de Pearson de NO <sub>2</sub> y variables climáticas para la estación IPAC en la semana de otoño.....                                      | 62 |
| Figura 48. Correlación de Pearson de NO <sub>2</sub> y variables climáticas para la estación EPPDM en la semana de otoño. ....                                    | 63 |
| Figura 49. Correlación de Pearson de NO <sub>2</sub> y variables climáticas para la estación Biblioteca en la semana de otoño. ....                               | 64 |
| Figura 50. Histograma de la variable NO <sub>2</sub> del Sensor Sentinel - 5P correspondiente al 7 de febrero de 2019, sin ninguna transformación. ....           | 69 |
| Figura 51. Histograma de la variable NO <sub>2</sub> del Sensor Sentinel - 5P correspondiente al 7 de febrero de 2019, con transformación logarítmica. ....       | 69 |
| Figura 52. Normal QQPlot de la variable NO <sub>2</sub> del Sensor Sentinel - 5P correspondiente al 7 de febrero de 2019, sin ninguna transformación. ....        | 69 |
| Figura 53. Normal QQPlot de la variable NO <sub>2</sub> del Sensor Sentinel - 5P correspondiente al 7 de febrero de 2019, con transformación logarítmica. ....    | 69 |
| Figura 54. Trend Analysis de la variable NO <sub>2</sub> del Sensor Sentinel - 5P correspondiente al 7 de febrero de 2019. ....                                   | 70 |
| Figura 55. Histograma de la variable NO <sub>2</sub> del Sensor Sentinel - 5P correspondiente al 8 de septiembre de 2021, sin ninguna transformación. ....        | 71 |
| Figura 56. Histograma de la variable NO <sub>2</sub> del Sensor Sentinel - 5P correspondiente al 8 de septiembre de 2021, con transformación logarítmica. ....    | 71 |
| Figura 57. Normal QQPlot de la variable NO <sub>2</sub> del Sensor Sentinel - 5P correspondiente al 8 de septiembre de 2021, sin ninguna transformación.....      | 71 |
| Figura 58. Normal QQPlot de la variable NO <sub>2</sub> del Sensor Sentinel - 5P correspondiente al 8 de septiembre de 2021, con transformación logarítmica. .... | 71 |
| Figura 59. Trend Analysis de la variable NO <sub>2</sub> del Sensor Sentinel - 5P correspondiente al 8 de septiembre de 2021. ....                                | 71 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 60. Modelo semi-variograma gaussiano de la variable NO <sub>2</sub> del Sensor Sentinel - 5P correspondiente al 7 de febrero de 2019. ....               | 73 |
| Figura 61. Comparación entre Kriging Simple y Kriging Ordinario de NO <sub>2</sub> del Sensor Sentinel - 5P correspondiente al 7 de febrero de 2019. ....       | 73 |
| Figura 62. Modelo semi-variograma gaussiano de la variable NO <sub>2</sub> del Sensor Sentinel - 5P correspondiente al 8 de septiembre de 2021. ....            | 74 |
| Figura 63. Comparación entre Kriging Simple y Kriging Ordinario de NO <sub>2</sub> del Sensor Sentinel - 5P correspondiente al 8 de septiembre de 2021. ....    | 74 |
| Figura 64. Mapa de interpolación de NO <sub>2</sub> del Sensor Sentinel – 5P en el VSLP el 3 de diciembre de 2019. ....   | 75 |
| Figura 65. Mapa de interpolación de NO <sub>2</sub> del Sensor Sentinel – 5P en el VSLP el 25 de mayo de 2020. ....   | 75 |
| Figura 66. Mapa de interpolación de NO <sub>2</sub> del Sensor Sentinel – 5P en el VSLP el 7 de julio de 2020. ...  | 75 |
| Figura 67. Mapa de interpolación de NO <sub>2</sub> del Sensor Sentinel – 5P en el VSLP el 8 de septiembre de 2021. ....  | 75 |
| Figura 68. Mapa de interpolación de NO <sub>2</sub> del Sensor Sentinel – 5P en el VSLP el 7 de febrero de 2019. ....   | 76 |
| Figura 69. Mapa de interpolación de NO <sub>2</sub> del Sensor Sentinel – 5P en el VSLP el 19 de diciembre de 2019. ....  | 76 |
| Figura 70. Mapa de interpolación de NO <sub>2</sub> del Sensor Sentinel – 5P en el VSLP el 23 de diciembre de 2019. ....  | 76 |
| Figura 71. Mapa de interpolación de NO <sub>2</sub> del Sensor Sentinel – 5P en el VSLP el 6 de enero de 2020. ....   | 76 |
| Figura 72. Mapa de interpolación de NO <sub>2</sub> del Sensor Sentinel – 5P en el VSLP el 10 de noviembre de 2021. ....  | 76 |
| Figura 73. Mapa de interpolación de NO <sub>2</sub> del Sensor Sentinel – 5P en el VSLP el 24 de diciembre de 2021. ....  | 76 |
| Figura 74. Temperatura mínima del periodo (1980-2000). ....   | 81 |
| Figura 75. Temperatura mínima del periodo (2001-2021). ....   | 81 |
| Figura 76. Diferencia climática de temperatura mínima entre el periodo de (1980-2000) y (2001-2021). ....   | 81 |
| Figura 77. Temperatura máxima del periodo (1980-2000). ....   | 82 |
| Figura 78. Temperatura máxima del periodo (2001-2021). ....   | 82 |
| Figura 79. Diferencia climática de temperatura máxima entre el periodo de (1980-2000) y (2001-2021). ....   | 82 |
| Figura 80. Precipitación total del periodo (1980-2000). ....  | 83 |
| Figura 81. Precipitación total del periodo (2001-2021). ....  | 83 |
| Figura 82. Diferencia climática de precipitación entre el periodo de (1980-2000) y (2001-2021). ....  | 83 |
| Figura 83. Velocidad de viento máxima del periodo (1980-2000). ....   | 84 |
| Figura 84. Velocidad de viento máxima del periodo (2001-2021). ....   | 84 |
| Figura 85. Diferencia climática de velocidad de viento máxima entre el periodo de (1980-2000) y (2001-2021). ....   | 84 |
| Figura 86. Anomalía de temperatura mínima (diferencia de temperatura mínima de 1-dic-2020 al 28-feb-2021 con respecto al promedio histórico de 1980-2021). .... | 85 |
| Figura 87. Anomalía de temperatura mínima (diferencia de temperatura mínima de 1-mar-2021 al 31-may-2021 con respecto al promedio histórico de 1980-2021). .... | 85 |
| Figura 88. Anomalía de temperatura mínima (diferencia de temperatura mínima de 1-jun-2021 al 31-ago-2021 con respecto al promedio histórico de 1980-2021). .... | 85 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 89. Anomalía de temperatura mínima (diferencia de temperatura mínima de 1-sep-2021 al 30-nov-2021 con respecto al promedio histórico de 1980-2021). .....              | 85 |
| Figura 90. Anomalía de temperatura máxima (diferencia de temperatura máxima de 1-dic-2020 al 28-feb-2021 con respecto al promedio histórico de 1980-2021). .....              | 86 |
| Figura 91. Anomalía de temperatura máxima (diferencia de temperatura máxima de 1-mar-2021 al 31-may-2021 con respecto al promedio histórico de 1980-2021). .....              | 86 |
| Figura 92. Anomalía de temperatura máxima (diferencia de temperatura máxima de 1-jun-2021 al 31-ago-2021 con respecto al promedio histórico de 1980-2021). .....              | 86 |
| Figura 93. Anomalía de temperatura máxima (diferencia de temperatura máxima de 1-sep-2021 al 30-nov-2021 con respecto al promedio histórico de 1980-2021). .....              | 86 |
| Figura 94. Anomalía de temperatura media (diferencia de temperatura media de 1-dic-2020 al 28-feb-2021 con respecto al promedio histórico de 1980-2021). .....                | 87 |
| Figura 95. Anomalía de temperatura media (diferencia de temperatura media de 1-mar-2021 al 31-may-2021 con respecto al promedio histórico de 1980-2021). .....                | 87 |
| Figura 96. Anomalía de temperatura media (diferencia de temperatura media de 1-jun-2021 al 31-ago-2021 con respecto al promedio histórico de 1980-2021). .....                | 87 |
| Figura 97. Anomalía de temperatura media (diferencia de temperatura media de 1-sep-2021 al 30-nov-2021 con respecto al promedio histórico de 1980-2021). .....                | 87 |
| Figura 98. Anomalía de precipitación de invierno (diferencia de precipitación acumulada de 1-dic-2020 al 28-feb-2021 con respecto al promedio histórico de 1980-2021). .....  | 88 |
| Figura 99. Anomalía de precipitación de primavera (diferencia de precipitación acumulada de 1-mar-2021 al 31-may-2021 con respecto al promedio histórico de 1980-2021). ..... | 88 |
| Figura 100. Anomalía de precipitación del verano (diferencia de precipitación acumulada de 1-jun-2021 al 31-ago-2021 con respecto al promedio histórico de 1980-2021). .....  | 88 |
| Figura 101. Anomalía de precipitación de otoño (diferencia de precipitación acumulada de 1-sep-2021 al 30-nov-2021 con respecto al promedio histórico de 1980-2021). .....    | 88 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1. Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio de los municipios de San Luis Potosí-Soledad de Graciano Sánchez en 2016. ....            | 29 |
| Tabla 2. Inventario de Emisiones Porcentual de Contaminantes Criterio de los municipios de San Luis Potosí-Soledad de Graciano Sánchez en 2016. .... | 29 |
| Tabla 3. Semanas analizadas en el periodo 2019-2021. ....  | 33 |
| Tabla 4. Matriz de correlación de Pearson para la estación IPAC en la semana de invierno. ....   | 43 |
| Tabla 5. Matriz de correlación de Pearson para la estación EPPDM en la semana de invierno. ....  | 43 |
| Tabla 6. Matriz de correlación de Pearson para la estación DIF en la semana de invierno. ....  | 44 |
| Tabla 7. Matriz de correlación de Pearson para la estación Biblioteca en la semana de invierno. ....   | 44 |
| Tabla 8. Matriz de correlación de Pearson para la estación IPAC en la semana de primavera. ....  | 45 |
| Tabla 9. Matriz de correlación de Pearson para la estación EPPDM en la semana de primavera. ....   | 45 |
| Tabla 10. Matriz de correlación de Pearson para la estación DIF en la semana de primavera. ....  | 46 |
| Tabla 11. Matriz de correlación de Pearson para la estación Biblioteca en la semana de primavera. ....   | 46 |
| Tabla 12. Matriz de correlación de Pearson para la estación IPAC en la semana de verano. ....  | 47 |
| Tabla 13. Matriz de correlación de Pearson para la estación EPPDM en la semana de verano. ....   | 47 |
| Tabla 14. Matriz de correlación de Pearson para la estación DIF en la semana de verano. ....   | 48 |
| Tabla 15. Matriz de correlación de Pearson para la estación Biblioteca en la semana de verano. ....  | 48 |
| Tabla 16. Matriz de correlación de Pearson para la estación IPAC en la semana de verano. ....  | 49 |
| Tabla 17. Matriz de correlación de Pearson para la estación EPPDM en la semana de verano. ....   | 49 |

|   |    |
|---|----|
| Tabla 18. Matriz de correlación de Pearson para la estación DIF en la semana de verano.....   | 50 |
| Tabla 19. Matriz de correlación de Pearson para la estación Biblioteca en la semana de verano. ....   | 50 |
| Tabla 20. Matriz de correlación de Pearson de NO <sub>2</sub> y variables climáticas para la estación IPAC en la semana de invierno.....  | 51 |
| Tabla 21. Matriz de correlación de Pearson de NO <sub>2</sub> y variables climáticas para la estación EPPDM en la semana de invierno.....   | 52 |
| Tabla 22. Matriz de correlación de Pearson de NO <sub>2</sub> y variables climáticas para la estación DIF en la semana de invierno.....   | 53 |
| Tabla 23. Matriz de correlación de Pearson de NO <sub>2</sub> y variables climáticas para la estación Biblioteca en la semana de invierno. ....                                     | 54 |
| Tabla 24. Matriz de correlación de Pearson de NO <sub>2</sub> y variables climáticas para la estación IPAC en la semana de primavera. ....  | 55 |
| Tabla 25. Matriz de correlación de Pearson de NO <sub>2</sub> y variables climáticas para la estación EPPDM en la semana de primavera.....  | 56 |
| Tabla 26. Matriz de correlación de Pearson de NO <sub>2</sub> y variables climáticas para la estación Biblioteca en la semana de primavera.....                                     | 57 |
| Tabla 27. Matriz de correlación de Pearson de NO <sub>2</sub> y variables climáticas para la estación IPAC en la semana de verano .....   | 58 |
| Tabla 28. Matriz de correlación de Pearson de NO <sub>2</sub> y variables climáticas para la estación EPPDM en la semana de verano.....   | 59 |
| Tabla 29. Matriz de correlación de Pearson de NO <sub>2</sub> y variables climáticas para la estación DIF en la semana de verano. ....  | 60 |
| Tabla 30. Matriz de correlación de Pearson de NO <sub>2</sub> y variables climáticas para la estación Biblioteca en la semana de verano. ....                                       | 61 |
| Tabla 31. Matriz de correlación de Pearson de NO <sub>2</sub> y variables climáticas para la estación IPAC en la semana de otoño.....   | 62 |
| Tabla 32. Matriz de correlación de Pearson de NO <sub>2</sub> y variables climáticas para la estación EPPDM en la semana de otoño. ....   | 63 |
| Tabla 33. Matriz de correlación de Pearson de NO <sub>2</sub> y variables climáticas para la estación Biblioteca en la semana de otoño.....   | 64 |
| Tabla 34. Interpretación de correlación de NO <sub>2</sub> del sensor Sentinel-5P y NO <sub>2</sub> de las estaciones de monitoreo de calidad del aire de la SEGAM.....             | 65 |
| Tabla 35. Interpretación de correlación de Pearson entre NO <sub>2</sub> y las variables climáticas disponibles en las estaciones de monitoreo de calidad del aire de la SEGAM..... | 65 |
| Tabla 36. AMSLP, superficie urbana y del paisaje, 2017.....   | 79 |

## **ÍNDICE DE ECUACIONES**

|   |    |
|---|----|
| Ecuación 1. Anomalía climática para la variable X.....    | 80 |
| Ecuación 2. Diferencia climática para la variable X. .... | 80 |

## RESUMEN

El crecimiento de la ciudad, reflejado en la extensión de la mancha urbana, el aumento del número de automóviles en circulación, la apertura de nuevos comercios y la intensificación de la actividad industrial, implica un mayor consumo de energía y, como consecuencia, un aumento en la generación de contaminantes atmosféricos dentro del Valle de San Luis Potosí.

La presente investigación se centra en el estudio de cuencas atmosféricas con el propósito de comprender la dinámica del dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ). Para ello, se integraron datos de contaminación atmosférica del satélite (SENTINEL 5-P) y de estaciones de superficie operadas por la Secretaría de Ecología y Gestión Ambiental (SEGAM), con el fin de establecer correlaciones que permitieran evaluar la coherencia de la información en distintos niveles de observación. Posteriormente, se aplicó el método de interpolación Kriging a los datos obtenidos del satélite en formato ráster, lo que posibilitó una representación espacial más precisa de la distribución del  $\text{NO}_2$  en el área de estudio.

El análisis se desarrolló en el periodo de 2019-2021, considerando las cuatro temporadas del año. Así mismo, se realizó un análisis de variabilidad climática donde se examinó la influencia del desarrollo urbano derivado de actividades económicas y los cambios de uso de suelo, factores que inciden directamente en los cambios del clima.

El carácter interdisciplinario de este trabajo resulta fundamental, ya que integra herramientas como Sistemas de Información Geográfica (SIG), estadística, geoestadística y variabilidad climática. Con el fin de generar conocimiento útil para el diseño de estrategias de gestión que fortalezcan la construcción de ciudades sostenibles. Además de aportar información útil para la toma de decisiones en materia de política pública y planeación urbana.

Palabras clave: cuencas atmosféricas, dióxido de nitrógeno, Kriging, correlación de Pearson, variabilidad climática.

## **ABSTRACT**

The growth of the city, reflected in the expansion of the urban expansion, the increase in the number of cars in circulation, the opening of new businesses, and the intensification of industrial activity, entails greater energy consumption and, consequently, an increase in the generation of air pollutants within the San Luis Potosí Valley.

This research focuses on the study of atmospheric basins with the aim of understanding the dynamics of nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>). To do this, air pollution data from the satellite (SENTINEL 5-P) and surface stations operated by the (Secretaría de Ecología y Gestión Ambiental, SEGAM) were integrated to establish correlations that would allow for the assessment of the consistency of the information at different observation levels. The Kriging interpolation method was then applied to the satellite data in raster format, enabling a more accurate spatial representation of the NO<sub>2</sub> distribution in the study area.

The analysis was conducted during the period of 2019-2021, considering the four seasons of the year. A climate variability analysis was also conducted, examining the influence of urban development resulting from economic activities and land-use changes, factors that directly impact climate change.

The interdisciplinary nature of this work is essential, as it integrates tools such as Geographic Information Systems (GIS), statistics, geostatistics, and climate variability. The goal is to generate useful knowledge for the design of management strategies that strengthen the construction of sustainable cities. In addition to provides useful information for decision-making in public policy and urban planning.

Keywords: atmospheric basins, nitrogen dioxide, Kriging, Pearson correlation, climate variability.

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Título

Manejo de cuencas atmosféricas y evaluación de Dióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>) con relación a la variabilidad climática en el valle de San Luis Potosí a partir del análisis espacial.

## 1.2 Antecedentes

En México la contaminación atmosférica es un problema ambiental de gran relevancia, el acelerado crecimiento demográfico y su concentración en asentamientos urbanos ha tenido repercusiones en el aumento de movilidad, hábitos de consumo y por ende el incremento de emisiones al ambiente (López, 2014), esto tiene consecuencias en la salud pública, el desarrollo social y el crecimiento económico, lo que representa una amenaza a la sostenibilidad del país (Velasco et al., 2018).

En ciudades industrializadas como Beijing-Tianjin-Hebei, la contaminación del aire se ha convertido en un problema grave en China especialmente las partículas finas, también llamadas PM<sub>2.5</sub>, de manera que un método de monitoreo para estimar PM<sub>2.5</sub> a nivel del suelo es la teledetección y su indicador Aerosol Optical Depth (AOD). (Wu et al., 2016). Estos datos tienen un gran potencial de aplicación para modelar la calidad del aire a nivel del suelo (Schliep et al., 2015).

La isla de calor urbano es otro problema importante que ha dado lugar a una serie de problemas ecológicos y medioambientales que amenazan gravemente el desarrollo sostenible de las zonas urbanas. (Hage, 2003). La ciudad de Wuhan es la metrópolis de urbanización más rápida en China donde a través de imágenes de teledetección del satélite HJ-1B e índices de vegetación se ha podido monitorear este fenómeno. (Wu et al., 2014).

Así mismo existen modelos de calidad del aire como el Modelo de investigación y pronóstico meteorológico con química (WRF-Chem) que tiene como mayor ventaja el acoplamiento de información meteorológica y química completamente acoplados en resolución espacial y temporal, este modelo se ha utilizado ampliamente en la simulación de contaminación del aire. (Zhang et al., 2018).

Con el objetivo de mejorar y conservar la calidad del aire, México desarrollo los Programas para Mejorar la Calidad del Aire (ProAire), un instrumento que refleja el compromiso compartido entre la sociedad y los tres órdenes de gobierno (Federal, Estatal y Municipal), estos documentos son elaborados por las autoridades locales de cada entidad federativa con la guía administrativa y técnica del gobierno federal y donde participan expertos en la materia, incluyendo a los que se desempeñan en la academia, centros de investigación y sociedad civil organizada (CAME, 2017). Actualmente el país cuenta con 37 ProAire vigentes que cubren todos los estados del territorio nacional. Sin embargo, la falta de recursos humanos, financieros y técnicos han sido obstáculos para que los gobiernos locales atiendan esta problemática con eficacia, por lo que es importante buscar estrategias novedosas que sean de ayuda en la forma de resolver esta problemática.

Existen métodos geoestadísticos importantes para estimar datos desconocidos, utilizando datos de muestra conocidos. Los métodos de interpolación espacial comúnmente utilizados son la Interpolación ponderada por distancia inversa (IDW), la interpolación Kriging Ordinario (OK) y la interpolación de superficie de tendencia (TS), entre otros. (Zhang et al., 2018). Se han realizado diversos estudios para determinar la calidad del aire con la ayuda de tecnologías espaciales entre ellos está el que desarrollaron (Beloconi et al., 2018) donde se investigó el potencial de los productos derivados de imágenes satelitales y diferentes métodos geoestadísticos para identificar las concentraciones de material particulado (PM) con una resolución espacial de 1 km<sup>2</sup> en 46 países europeos.

### **1.3 Enunciado del problema**

Diversos estudios epidemiológicos han demostrado que las exposiciones a PM<sub>2.5</sub> se asocian con un aumento de ingresos hospitalarios, la morbilidad y la mortalidad relacionadas con las vías respiratorias. (Pope et al., 2002). El monitoreo y difusión de estos datos, así como el análisis climático es importante, para realizar estudios ambientales y en un futuro redactar políticas adecuadas de control de la contaminación del aire.

## **1.4 Preguntas de investigación**

¿Qué papel tiene la cuenca atmosférica del valle de San Luis Potosí en la dispersión de los contaminantes atmosféricos?

¿El estudio de la meteorología-climatología de la región puede ser un factor para determinar los fenómenos de dispersión de los contaminantes?

¿Qué se puede hacer para identificar, controlar, prevenir y mitigar los contaminantes atmosféricos en la Ciudad de San Luis Potosí?

## **1.5 Justificación**

La ampliación de la mancha urbana, un crecimiento del número de vehículos en circulación, un mayor número de comercios, crecimiento de la industria y otras actividades, hacen necesario crecer en el consumo energético que repercute en un aumento en la generación de emisiones contaminantes. (SARAN-SEGAM, 2018).

En la ciudad de San Luis Potosí los mayores generadores de partículas  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  son las ladrilleras y la industria metalúrgica y le siguen en orden de importancia los transportes de carga que utilizan diésel como combustible entre otros. (SARAN-SEGAM, 2018).

Las partículas finas  $PM_{2.5}$  son el principal contaminante en muchas ciudades, estas afectan seriamente la calidad del aire y la salud humana, de forma que el monitoreo rápido y efectivo de estas partículas en las concentraciones urbanas, así como el análisis de sus características espaciotemporales, son importantes para prevenir sobre la contaminación del aire y garantizar la seguridad del medio ambiente urbano y la salud de sus residentes. (Wang et al., 2020).

## **1.6 Objetivo General**

Analizar la correlación y la distribución espacial del dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) y variables meteorológicas asociadas a la cuenca atmosférica de la ciudad de San Luis Potosí, mediante el uso de técnicas de percepción remota, estadísticas y geoestadísticas, para conocer el comportamiento y la variabilidad climática que acompaña dichas condiciones atmosféricas.

## **1.7 Objetivos específicos**

- Caracterizar la cuenca atmosférica en la zona metropolitana de San Luis Potosí.
- Monitorear la distribución y evolución de dióxido de nitrógeno en la cuenca atmosférica.
- Realizar la correlación de variables climáticas y contaminantes atmosféricos dentro de un mismo rango de tiempo en una zona determinada.
- Desarrollar una estrategia para medir la variabilidad climática en el valle de San Luis Potosí.

## **1.8 Marco conceptual.**

La contaminación atmosférica se constituye de la presencia de sustancias en la atmósfera que representan un riesgo, malestar o amenaza a la salud de las personas, seres vivos de un entorno determinado, tales contaminantes son producidos por diferentes fuentes y en su mayoría debidos a la quema de combustible y entre estas sustancias se encuentran las partículas  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$ , que son una compleja mezcla de sustancias líquidas y sólidas suspendidas en el aire, emitidas por fuentes fijas o móviles, formadas a partir de las reacciones entre gases producidos por la combustión.

La variabilidad climática representa variaciones en el estado medio del clima en todas las escalas temporales y espaciales, producidas por fenómenos meteorológicos determinados, por lo que cabe señalar que estas variaciones pueden tener repercusiones en la contaminación del aire, debido a su circulación dentro de una determinada zona como lo es una cuenca atmosférica. (Barrera et al., 2019) la define como una región geográfica delimitada por elevaciones montañosas con particularidades meteorológicas y climáticas semejantes, en donde las emisiones antropogénicas y naturales contribuyen a la calidad del aire de la región.

Otro fenómeno que se presenta en las grandes ciudades es la Isla de Calor Urbana (ICU) que es un fenómeno donde la temperatura aumenta significativamente durante las horas nocturnas, gracias a la acumulación de calor que generan los materiales urbanos, este fenómeno está asociado a la formación de contaminantes atmosféricos (Casillas et al., 2014).

Para el estudio de estos fenómenos tanto naturales como antrópicos las herramientas de análisis espacial son de gran utilidad, como el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) que son un conjunto de herramientas que permiten consultar, integrar, almacenar, analizar, modelar y representar información vinculada a una referencia espacial y la Teledetección que es una técnica que permite obtener información de un objeto en particular situado sobre la superficie terrestre desde sensores o radares instalados en plataformas espaciales a través de la interacción electromagnética entre el terreno y el sensor (Chuvieco, 1996). Otra herramienta de gran utilidad es la Geoestadística, rama de la estadística aplicada y especializada en el análisis y modelación de la variabilidad espacial de los datos, misma que tiene por objeto analizar y predecir variables específicas en el espacio-tiempo (Noyola, 2013).

Hoy en día la contaminación del aire es un problema ambiental de gran relevancia, por lo que es necesario profundizar en el conocimiento del impacto ambiental que provocan los contaminantes atmosféricos, de manera que el estudio de estas variables con las técnicas adecuadas puede ayudar al establecimiento de medidas que contribuyan a reducir los niveles de contaminación y contribuir al desarrollo sostenible en las ciudades (Hernández et al., 2019).

## **1.9 Hipótesis**

El comportamiento de los contaminantes atmosféricos puede ser cuantificado de manera confiable a partir del uso de tecnologías geoespaciales, un adecuado monitoreo de sus concentraciones y de la variabilidad climática que se presenta en la cuenca atmosférica del municipio de San Luis Potosí.

### **1.10 Diseño metodológico y técnicas de investigación**

La metodología utilizada consiste principalmente en efectuar un estado del arte sobre los aspectos que involucran esta investigación, desde la contaminación atmosférica abordada con tecnologías espaciales, ya sea con Sistemas de Información Geográfica o Teledetección, la variabilidad climática y sus relaciones con los contaminantes atmosféricos, así como las fuentes de contaminación en la zona urbana, ya sean fijas o móviles y los diferentes métodos geoestadísticos aplicados a esta temática. La siguiente etapa consistirá en determinar la zona a través de un polígono que abarque el valle de San Luis Potosí y determinar la temporalidad del estudio de acuerdo a la información disponible en las diversas instancias o las distintas plataformas existentes, seguido de esto se recopilará la información que se empleará como datos históricos de variables climáticas provenientes de estaciones meteorológicas que se encuentran dentro del polígono de estudio y de contaminantes atmosféricos provenientes de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de la ciudad de San Luis Potosí y Zona Conurbada, datos que son generados por cuatro casetas de monitoreo y validados por la Secretaría de Ecología y Gestión Ambiental (SEGAM), imágenes satelitales del sensor TROPOMI del satélite Sentinel 5P de la Agencia Espacial Europea disponibles en el repositorio de Copernicus Open Acces Hub e información cartográfica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Las tecnologías que se van a utilizar para estos procesos son ArcGis, QGIS y RStudio.

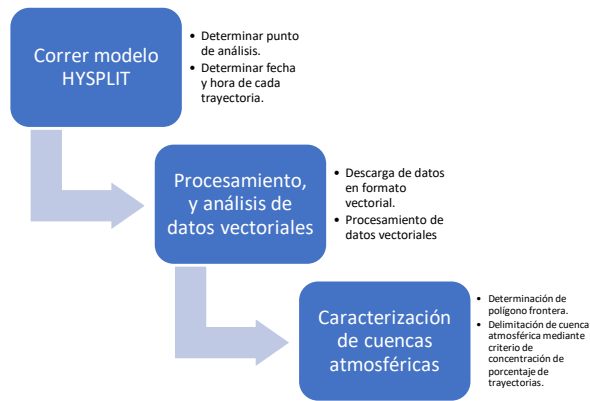


Figura 1. Metodología utilizada para la caracterización de cuencas atmosféricas en el VSLP.

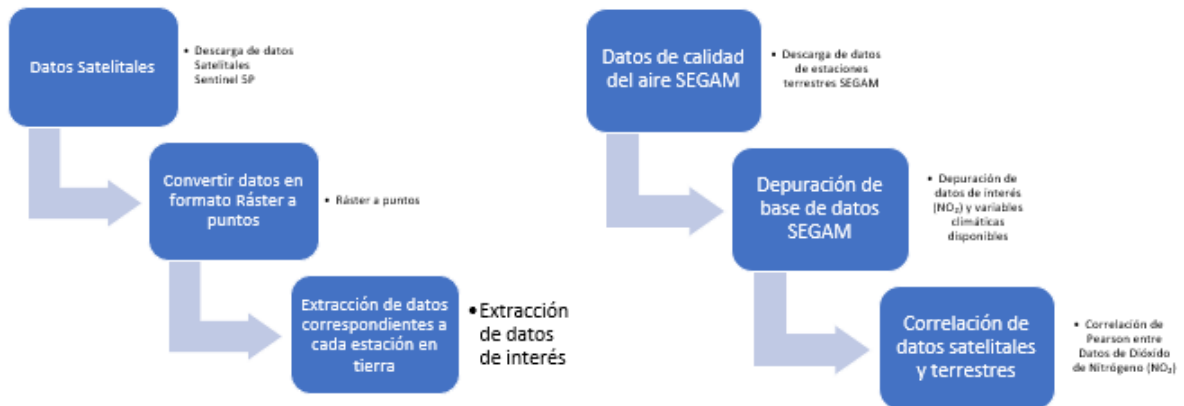


Figura 2. Metodología utilizada para el procesamiento y análisis de correlación de los datos de sensor remoto Sentinel-5P y estaciones terrestres (SEGAM).

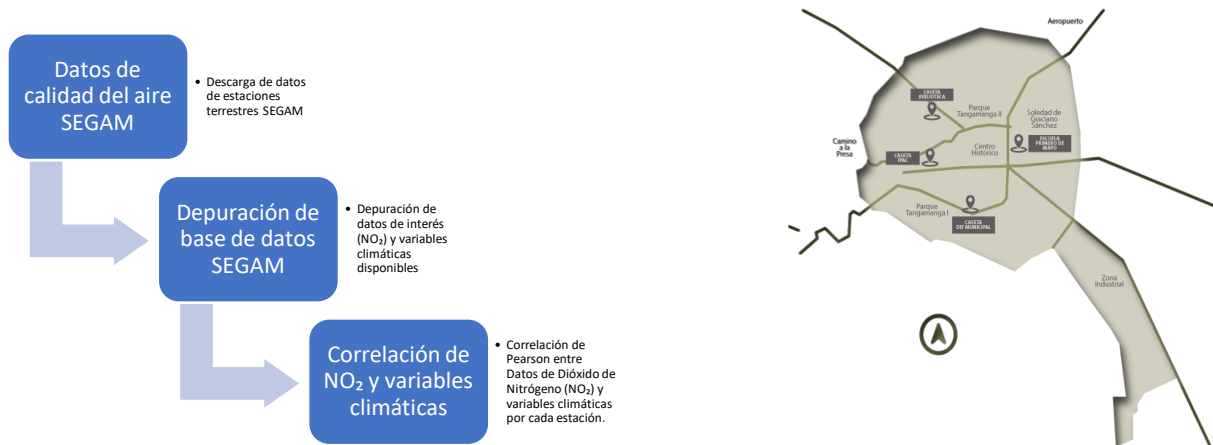


Figura 3. Metodología utilizada para el procesamiento y análisis de correlación de las concentraciones de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y variables climáticas disponibles por estación.

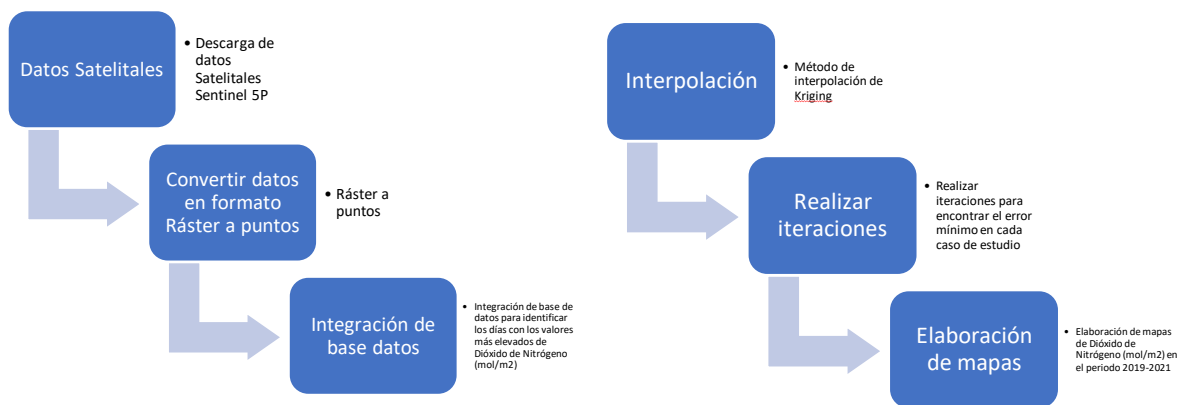


Figura 4. Metodología utilizada para análisis geoestadístico de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) de sensor remoto Sentinel-5P realizado con método de interpolación (Kriging)

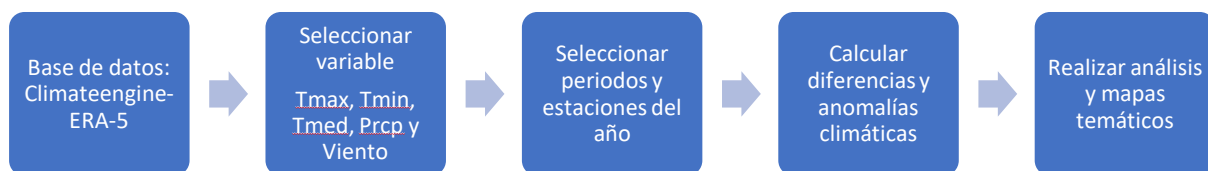


Figura 5. Metodología utilizada para análisis de variabilidad climática con la base de información de Climateengine-ERA-5

## 2. CAPÍTULO 1. CARACTERIZACIÓN DE CUENCAS ATMOSFÉRICAS Y DISTRIBUCIÓN DE DIÓXIDO DE NITRÓGENO EN EL VALLE DE SAN LUIS POTOSÍ.

### 2.1 Zona de estudio

El valle de San Luis Potosí cubre gran parte la zona conurbada de los municipios de San Luis Potosí y Soledad de Graciano Sánchez, así como los límites con Armadillo de los Infantes, Cerro de San Pedro, Mexquitic de Carmona, Villa de Arriaga, Villa de Reyes y Zaragoza, se encuentra rodeado hacia el occidente por la Sierra de San Miguelito y al este por la Sierra de Álvarez, cubre gran parte la zona conurbada de San Luis Potosí, cuenta con una superficie de alrededor 101,650 ha y tiene una altitud entre los 1800 y los 1850 msnm.

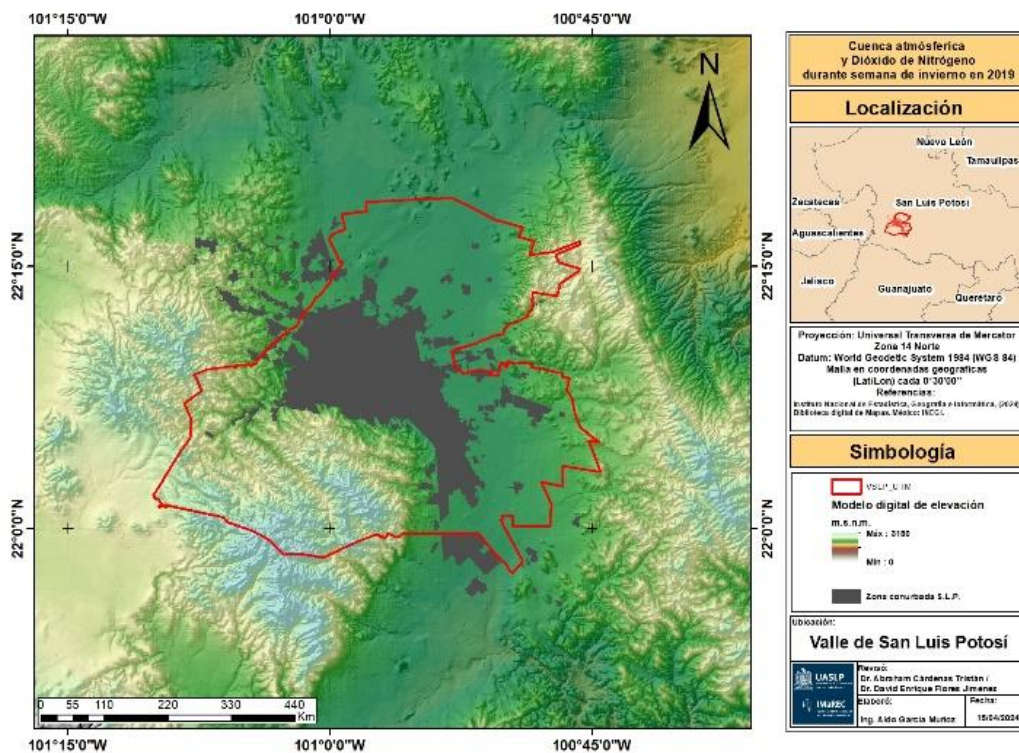


Figura 6 Ubicación de la zona de estudio

### 2.2 Clima

Según la clasificación climática de Köppen, modificada por Enriqueta García en 1964 para las condiciones de México, en el 68% de la superficie del VSLP predomina el clima árido templado (BSOkw) y el 32% semiárido templado (BS1kw) ambos con una

temperatura media anual entre 12°C y 18°C, -3°C y 18°C en el mes más frío con lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2 del total anual.

### 2.3 Hidrología

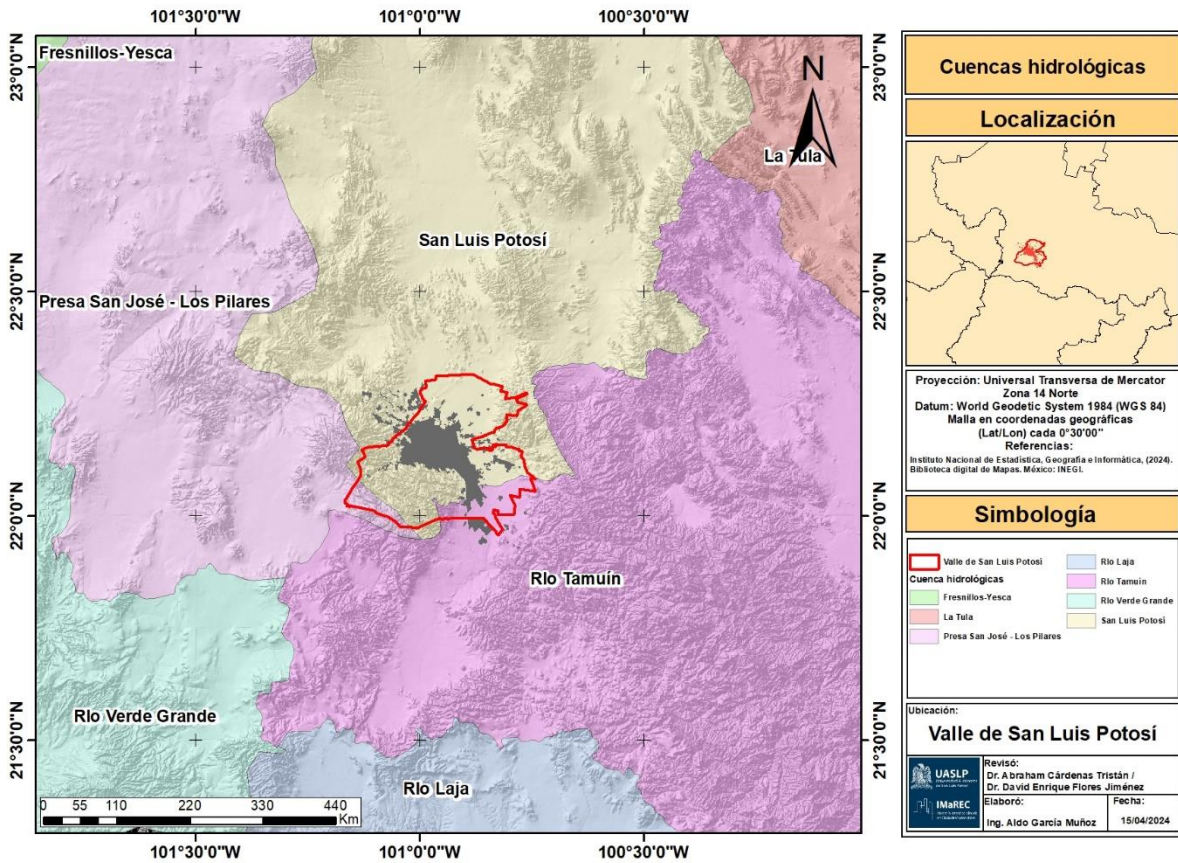


Figura 7. Ubicación del VSLP en las cuencas hidrológicas.

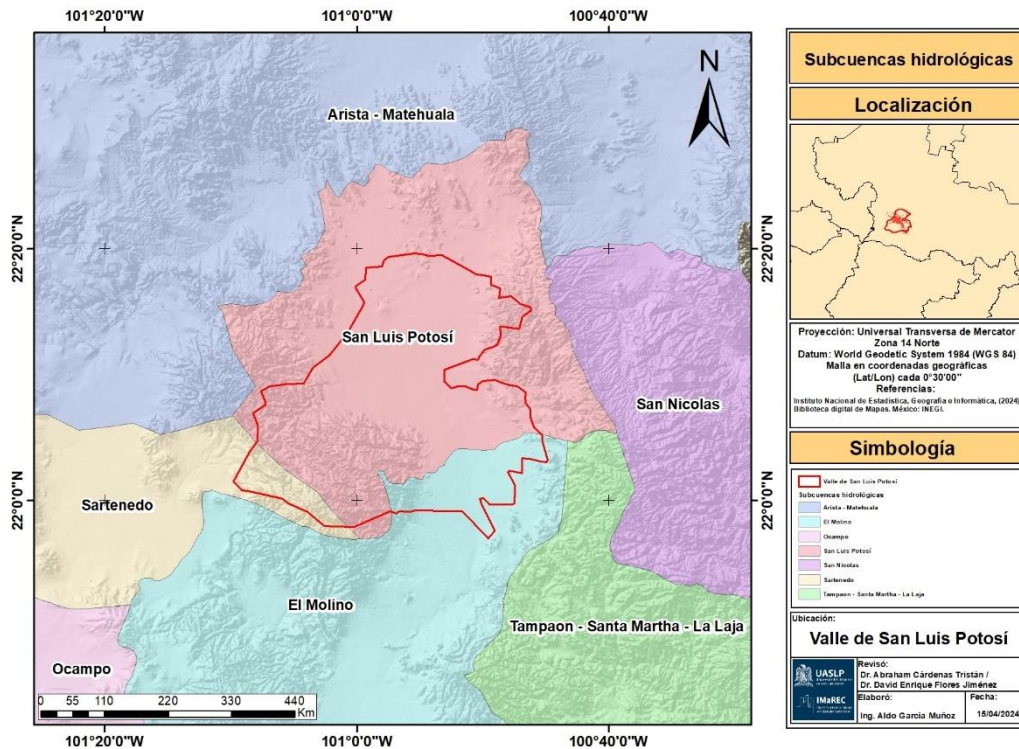


Figura 8. Ubicación del VSLP en las subcuencas hidrológicas.

El VSLP se encuentra ubicado en la región hidrológica VII Cuencas Centrales del Norte, la mayor parte pertenece a la subregión del Salado y a Río Alto Panuco, la subcuenca de San Luis Potosí cubre la mayor parte del valle y al sur la subcuenca de El Molino y Sartenedo, forma parte de las cuencas hidrológicas Presa San José-Los Pilares, San Luis Potosí y Río Tamuín, así como de las cuencas hidrográficas Río Panuco y cuenca de San Luis Potosí.

## 2.4 Marco Jurídico

En México, existen diversos instrumentos jurídicos orientados a la regulación de la calidad del aire con el fin de controlar, mitigar y prevenir la contaminación atmosférica. Sin embargo, la falta de seguimiento por parte de las autoridades, el desinterés de algunos actores sociales y el desconocimiento de la población dificultan su aplicación efectiva, lo que deriva en múltiples problemáticas ambientales y de salud pública.

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos establece en su artículo 4º el derecho de toda persona a la protección de la salud, así como a disfrutar de un

medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar. Asimismo, se establece que el Estado garantizará el respeto a este derecho, y que cualquier daño o deterioro ambiental generará responsabilidad para quien lo provoque (Federal, 2001).

En relación con la constitución, la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) tiene como propósito contribuir al desarrollo sostenible y asegurar el derecho de la población a un medio ambiente adecuado. En su Título Cuarto, se establece la obligación de controlar y reducir los contaminantes atmosféricos, tanto de fuentes fijas como móviles, con el fin de preservar la calidad del aire y el equilibrio ecológico. Además, se faculta a las entidades federativas y municipios para definir zonas de instalación industrial, promover tecnologías menos contaminantes, integrar inventarios de emisiones, implementar sistemas de verificación vehicular y aplicar sanciones en caso de incumplimiento (LGEEPA, 1988). El Reglamento de la LGEEPA en materia de prevención y control de la contaminación atmosférica complementa estas disposiciones, delimitando competencias federales y locales, estableciendo criterios de control para fuentes de emisión fijas y móviles, y definiendo medidas de vigilancia, sanción y seguridad ambiental (LGEEPA, 1988).

Con una visión de largo plazo, la Estrategia Nacional de la Calidad del Aire (ENCA) constituye un instrumento de planeación que proyecta al año 2030 la mejora de la calidad del aire en el país. Se fundamenta en el artículo 4º constitucional y en los principios de la LGEEPA, además de atender compromisos internacionales en materia ambiental. Este documento plantea 21 estrategias y 69 líneas de acción agrupadas en cinco ejes estratégicos: gestión integral de la calidad del aire, fortalecimiento institucional, compromiso del sector empresarial, formulación de políticas basadas en evidencia científica y participación social responsable. Asimismo, promueve la implementación de al menos un Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire (ProAire) en cada entidad federativa (Semarnat, 2018).

En materia local, el Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana de San Luis Potosí–Soledad de Graciano Sánchez (ProAire) constituye un ejemplo de aplicación regional de estas políticas. Dicho programa establece acciones a corto, mediano y largo plazo, orientadas a la reducción de emisiones provenientes de fuentes fijas, móviles y de servicios. Incluye, además, medidas de protección a la salud de la población, fomento de la educación ambiental,

conservación de los recursos naturales, planeación territorial y fortalecimiento de la gestión e infraestructura ambiental (Semarnat, 2015).

En conjunto, estos instrumentos conforman el marco legal y los programas que sustentan las políticas públicas en materia de calidad del aire en México, y reflejan el compromiso del país con la protección de la salud y del medio ambiente. Asimismo, es importante destacar que la implementación y el seguimiento de estas normativas están alineadas con la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, adoptada por la Organización de las Naciones Unidas en 2015, ya que contribuyen de manera directa al cumplimiento de diversos Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente en los ámbitos de salud y bienestar (ODS 3), energía asequible y no contaminante (ODS 7), industria, innovación e infraestructura (ODS 9), ciudades y comunidades sostenibles (ODS 11), producción y consumo responsables (ODS 12), acción por el clima (ODS 13) y alianzas para lograr los objetivos (ODS 17) (ONU, 2015).

## **2.5 Cuencas atmosféricas en el VSLP.**

### **2.5.1 Cuenca atmosférica**

Hoy en día no existe una definición, concepto o metodología única para determinar una cuenca atmosférica, sin embargo, desde hace algunas décadas su implementación en diversos casos de estudio de calidad del aire se hace cada vez más común debido a que favorece la comprensión distintos problemas ambientales y climáticos, ya sean para estudios académicos y/o gubernamentales a distintas escalas espaciales como la local y regional.

El estudio de la calidad del aire se hace cada vez más complejo en las zonas urbanas con gran actividad industrial, por lo que el uso de cuencas atmosféricas como unidad espacial posibilita una mejor gestión de la calidad del aire. Al igual que se trabaja en hidrología por medio de cuencas hidrológicas, en las cuales la administración del agua y el ciclo hidrológico están delimitados por las fronteras topográficas, en la gestión de la calidad del aire se toman en cuenta factores geofísicos como lo orografía y la dinámica de la atmosfera, no solamente los límites políticos.

El Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático define una cuenca atmosférica como un espacio geográfico, el cual está parcial o totalmente delimitado por elevaciones montañosas u otros atributos naturales con características meteorológicas y climáticas afines donde la calidad del aire a nivel estacional está influenciada por las fuentes de emisión antropogénicas y naturales en el interior de la misma, y en ciertos casos, por el transporte de contaminantes provenientes de otras cuencas (INECC, 2016). Otros autores hacen énfasis en considerar factores de emisiones, salud de la población y eventos extremos como nortes, frentes fríos e inversiones térmicas, Centro Mario Molina (como se citó en Magaña y Caetano, 2007).

Hay que tomar en cuenta que el transporte de los contaminantes hacia adentro y afuera en una zona definida ocurre de manera regular, por lo que se requiere la participación de los tomadores de decisiones de distintos niveles de más de una entidad federativa, así como considerar el dinamismo de la cuenca ya que por ejemplo en un determinado mes dicha cuenca puede ser completamente diferente a la de otro mes, y que la topografía juega un papel importante en la dispersión de los contaminantes cuando las condiciones de estabilidad son altas (p.ej. por condiciones de vientos en calma o baja radiación solar) (Magaña y Caetano, 2007). Por otro lado Davydova (2004), como se citó en Magaña y Caetano, 2007), propone determinar las altitudes de la zona de interés, el espesor de la capa límite de la atmósfera en donde se observa la fricción del flujo atmosférico dominante sobre la superficie terrestre (entre 1000 y 1500m), la dirección de los vientos dominantes y la identificación de los límites de las cuencas utilizando la información de la velocidad de los vientos dominantes en superficie, que se corrigen utilizando la información de altitudes topográficas, para establecer zonas de bajo nivel de ventilación o estancamiento del flujo.

García Reynoso et al. (2009), propone tomar en cuenta los patrones de viento, ya que en zonas urbanas como Puebla-Tlaxcala éstos cambian de dirección a lo largo del día, principalmente hacia el sur y al suroeste durante la madrugada, además de considerar componentes clave como el inventario de emisiones para identificar quienes son los generadores de contaminantes a la atmósfera y cuál es su aporte por sector o por fuente específica; y los modelos numéricos, que son indispensables para pronosticar la calidad del aire, analizar escenarios, evaluar virtualmente el impacto de medidas de control, construir mapas de excedencias de niveles y cargas críticas entre otros.

Tomando en cuenta lo anterior, para este estudio podemos definir a una cuenca atmosférica como una unidad espacial de gestión ambiental caracterizada por un espacio geográfico delimitado parcial o totalmente por accidentes topográficos como montañas, sierras o valles, dentro del cual se presentan condiciones meteorológicas y climáticas relativamente homogéneas. Su configuración se define principalmente por la dirección de los vientos dominantes en superficie, los niveles de contaminación más importantes y la orografía, que influye en la ventilación o el estancamiento del aire.

En este espacio, la calidad del aire está determinada por el balance entre las fuentes de emisión de contaminantes tanto antropogénicas como naturales, la dispersión de dichos contaminantes en la atmósfera y los procesos de transporte interregional de contaminantes. Por lo que una cuenca atmosférica es una unidad dinámica, cuya extensión y comportamiento pueden variar espacial y temporalmente.

#### **2.4.2 Distribución de Dióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>) en el VSLP.**

El dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) es un contaminante atmosférico clave, que se presenta como un gas de color rojizo en condiciones normales. Se forma principalmente por la oxidación del óxido nítrico (NO), el cual se libera durante la combustión de combustibles fósiles como el petróleo, el gas natural o el carbón. Este compuesto participa en reacciones químicas que dan lugar a otros contaminantes secundarios como el ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>), afectando la salud humana y contribuyendo al deterioro ambiental (INSST, 2018; SMADSOT, 2021). Este contaminante puede generar diversos efectos negativos en la salud humana entre los que se encuentran dificultades respiratorias como disnea, tos, producción de flema, irritación ocular y de garganta, fatiga y sensación de falta de aire (Berumen-Rodríguez et al., 2021). Asimismo, la interacción de hidrocarburos y dióxido de nitrógeno con la radiación solar favorece la formación de ozono troposférico (reacción fotoquímica), el cual, al combinarse con compuestos ácidos presentes en la atmósfera, origina sustancias altamente tóxicas para la vegetación. En particular, se ha señalado que la mortalidad de los árboles está relacionada con la presencia simultánea de elevadas concentraciones de ozono y la deposición ácida (Granados Sánchez et al., 2010). Según la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) establece límites para la exposición al NO<sub>2</sub> debido a sus efectos adversos en la salud

respiratoria. Según los estándares de calidad del aire, el límite promedio horario permitido para NO<sub>2</sub> es de 100 ppb (partes por mil millones), y el límite anual promedio es de 0.053 ppm (partes por millón) o 188 o 188 µg/m<sup>3</sup> (microgramos por metro cúbico) por hora. (EPA, 2021). En México la Norma Oficial Mexicana NOM-023-SSA1-1993 establece el promedio horario de 0.21 ppm (396 µg/m<sup>3</sup>) y como promedio diario 0.10 ppm (188 µg/m<sup>3</sup>), estos valores son de referencia para las políticas de vigilancia ambiental y evaluación de riesgos sanitarios en las zonas urbanas e industriales (DOF, 1994).

Con base en la actualización del inventario de emisiones y modelación de la calidad del aire realizado en 2018 por esta autoridad administrativa (Tabla 1) se registraron 23,159 (t/año) de Óxidos de Nitrógeno, de las cuales 18,247 provienen de fuentes móviles lo que equivale a un 79% de las emisiones de este contaminante (Tabla 2), para ese entonces el parque vehicular constaba de 403 mil vehículos, el cual en general tenía un promedio de 12 años de antigüedad, tomando en cuenta que la mancha urbana ha crecido exponencialmente en el estado de San Luis Potosí, las emisiones son mayores en la actualidad,

| Tipo de fuente      | Emisiones (t/año) |              |                 |                |                 |               |            |                 |
|---------------------|-------------------|--------------|-----------------|----------------|-----------------|---------------|------------|-----------------|
|                     | PM10              | PM2.5        | SO <sub>2</sub> | CO             | NO <sub>x</sub> | COV           | CN         | CH <sub>4</sub> |
| Fuentes puntuales   | 1,359             | 914          | 738             | 12,426         | 2,526           | 1,135         | 4          | 27              |
| Fuentes de área     | 2,440             | 1,508        | 137             | 1,233          | 704             | 13,201        | 33         | 52,648          |
| Fuentes Móviles     | 1,339             | 1,227        | 553             | 103,928        | 18,274          | 11,455        | 175        | 386             |
| Vegetación y suelos | N/A               | N/A          | N/A             | N/A            | 1,655           | 3,210         | N/A        | N/A             |
| <b>Total</b>        | <b>5,139</b>      | <b>3,649</b> | <b>1,427</b>    | <b>117,587</b> | <b>23,159</b>   | <b>29,001</b> | <b>213</b> | <b>53,061</b>   |

Tabla 1. Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio de los municipios de San Luis Potosí-Soledad de Graciano Sánchez en 2016.

| Tipo de fuente      | Emisiones porcentuales |             |                 |             |                 |             |             |                 |
|---------------------|------------------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|-------------|-----------------|
|                     | PM10                   | PM2.5       | SO <sub>2</sub> | CO          | NO <sub>x</sub> | COV         | CN          | CH <sub>4</sub> |
| Fuentes puntuales   | 26%                    | 25%         | 52%             | 11%         | 11%             | 4%          | 2%          | 0%              |
| Fuentes de área     | 47%                    | 41%         | 10%             | 1%          | 3%              | 46%         | 16%         | 99%             |
| Fuentes Móviles     | 26%                    | 34%         | 39%             | 88%         | 79%             | 39%         | 82%         | 1%              |
| Vegetación y suelos | N/A                    | N/A         | N/A             | N/A         | 7%              | 11%         | N/A         | N/A             |
| <b>Total</b>        | <b>100%</b>            | <b>100%</b> | <b>100%</b>     | <b>100%</b> | <b>100%</b>     | <b>100%</b> | <b>100%</b> | <b>100%</b>     |

Tabla 2. Inventario de Emisiones Porcentual de Contaminantes Criterio de los municipios de San Luis Potosí-Soledad de Graciano Sánchez en 2016.

San Luis Potosí cuenta con cuatro casetas de vigilancia que son gestionadas por la Secretaría de Ecología y Gestión Ambiental (SEGAM) como se puede apreciar en la figura 2, estas se encuentran ubicadas dentro de la zona conurbada de la capital potosina. Sin embargo, no existen estaciones de monitoreo en las periferias o en áreas que son sumamente transitadas como la zona industrial y los municipios colindantes. Es por ello por lo que es de suma utilidad implementar las nuevas tecnologías como la percepción remota para el monitoreo de los diferentes contaminantes atmosféricos ya que puede complementar la información capturada en la superficie terrestre por las casetas de monitoreo de calidad del aire.

El satélite Sentinel-5P, desarrollado como parte del programa europeo Copernicus, es fundamental para el monitoreo de la calidad del aire a nivel global. Su sensor principal, el TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument), proporciona mediciones diarias y globales de contaminantes atmosféricos, incluyendo el  $\text{NO}_2$ , con una resolución espacial de aproximadamente 7 km y un ancho de franja de 2,600 km (KNMI, 2017). TROPOMI utiliza cuatro espectrómetros que capturan rangos espectrales en el ultravioleta (UV), UV-visible (UVIS), infrarrojo cercano (NIR) y el infrarrojo de onda corta (SWIR), lo que permite identificar la presencia y distribución de gases traza como el  $\text{NO}_2$  en la atmósfera (Veefkind et al., 2012). Comparado con sus predecesores, este instrumento ofrece una mejor resolución espacial y sensibilidad (TROPOMI, 2018). Este sensor proporciona información diaria de distintos contaminantes para el análisis espacial de estos datos, se emplea la plataforma en la nube Google Earth Engine (GEE). Esta herramienta permite el manejo y visualización de grandes volúmenes de datos geoespaciales, facilitando estudios en áreas como agricultura, calidad del aire, cambio climático y recursos naturales (Gorelick, 2013; Engine, 2018). GEE ofrece acceso a los datos diarios del Sentinel-5P y permite desarrollar flujos de trabajo complejos mediante JavaScript o Python.

Diversos estudios han validado la eficacia de TROPOMI y otros sensores para monitorear el  $\text{NO}_2$ , (Petrìtoli et al., 2004) compararon mediciones in situ y satelitales de  $\text{NO}_2$  en la cuenca del río Po (Italia), encontrando que, bajo ciertas condiciones atmosféricas, los datos satelitales de GOME coincidían con las mediciones terrestres ( $R^2 = 0.9$ ), aunque observaron diferencias estacionales atribuidas a variaciones en la altura de mezcla atmosférica, (Bechle et al., 2013) demostraron una fuerte correlación ( $r = 0.93$ ) entre las columnas satelitales de  $\text{NO}_2$  (OMI) y mediciones terrestres en el

sur de California, usando factores de escala para convertir las concentraciones columnares en concentraciones superficiales, de igual manera (Paraschiv y Voiculescu, 2017) analizaron el contenido troposférico de NO<sub>2</sub> en ocho ciudades europeas entre 2005 y 2014. Encontraron correlaciones sólidas entre observaciones satelitales (OMI) y estaciones de monitoreo en tierra, especialmente en ciudades como Berlín, Madrid y Roma ( $R > 0.80$ ), validando la utilidad de la teledetección para estudios urbanos de calidad del aire.

En Bogotá, Colombia, Forero (2019) implementó una metodología para integrar datos de TROPOMI con estaciones locales. Los resultados mostraron una buena correspondencia entre las columnas totales de NO<sub>2</sub> satelitales y las observaciones locales, con una correlación de 0.44. Además, se identificó que las mayores concentraciones ocurren en meses con baja radiación solar y menores temperaturas, lo que también fue respaldado por (Ocak y Turalioglu, 2008), quienes observaron que el aumento de temperatura y viento reduce los niveles de NO<sub>2</sub>.

En Argentina, la Secretaría de Energía (2020) reportó una disminución significativa de NO<sub>2</sub> durante la cuarentena por COVID-19 en ciudades como Buenos Aires y Córdoba, evidenciada mediante datos de Sentinel-5P procesados con Google Earth Engine. En Helsinki, Finlandia, (Ialongo et al., 2020) compararon mediciones de TROPOMI con espectrómetros Pandora terrestres. Hallaron una correlación de  $r = 0.68$  y observaron que ambos métodos detectaban patrones semanales similares, especialmente la reducción de NO<sub>2</sub> durante los fines de semana debido a la menor actividad vehicular e industrial.

Finalmente, en Quito, Ecuador, (Arboleda y Vásquez, 2021) emplearon el sensor TROPOMI y estaciones locales para analizar los niveles de NO<sub>2</sub> durante 2018–2020. Aunque las correlaciones fueron bajas, se identificaron patrones similares de comportamiento, destacando la utilidad del satélite en la observación de tendencias generales.

Cabe mencionar que El sensor TROPOMI, a bordo del satélite Sentinel-5P, reporta las concentraciones de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) en mol/m<sup>2</sup>, una unidad que representa la cantidad total de moléculas en una columna vertical de la atmósfera, desde la superficie terrestre hasta la parte superior de la atmósfera. Este valor se conoce como columna total o columna troposférica, a diferencia de las estaciones

terrestres, que miden la concentración de  $\text{NO}_2$  en unidades de volumen como ppm o  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , las observaciones satelitales reflejan la densidad integrada verticalmente de  $\text{NO}_2$  sobre un área geográfica específica, entonces la conversión directa de  $\text{mol}/\text{m}^2$  a ppm o  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  no es posible sin información adicional como la altura de la columna atmosférica la cual varía diariamente con la presión y la temperatura, la distribución vertical del gas en la atmósfera, es decir, qué fracción del  $\text{NO}_2$  se encuentra cerca de la superficie y en la que se encuentra en niveles altos y la densidad del aire y la presión atmosférica en la zona de estudio. Debido a que estas variables son complejas, dependen de modelos atmosféricos y condiciones meteorológicas locales, por lo que intentar realizar una conversión directa sin tomar en cuenta estos parámetros terminaría por dar resultados erróneos o no representativos. Por ello, los estudios que comparan datos satelitales con estaciones terrestres utilizan factores de escala o modelos atmosféricos como TM5-MP para estimar las concentraciones a nivel del suelo a partir de las columnas troposféricas (TROPOMI, 2018; Eskes et al., 2019).

### **2.4.3 Insumos y caracterización de las cuencas atmosféricas**

Para el análisis, se tomó como punto de referencia la zona con mayor concentración de  $\text{NO}_2$  a partir de la información proveniente del satélite Sentinel-5P. Posteriormente, en el modelo HYSPLIT, (Rolph, Stein, & Stunder, 2017; Stein et al., 2015) se seleccionó la base de datos ERA-5, que ofrece información desde 1940 hasta la actualidad sobre las trayectorias de viento. Posteriormente, se definieron la fecha y el horario de interés, generando 24 trayectorias, correspondientes a cada hora del día. La información obtenida se descargó en formato vectorial.

Los datos vectoriales, inicialmente representados en puntos, fueron procesados para integrarlos en una sola capa de líneas que indica las trayectorias del día analizado. Con el fin de establecer un marco espacial de referencia, se construyeron polígonos de referencia conformados por tres octágonos concéntricos: uno central en torno a la zona de estudio, otro intermedio y uno externo que delimita la extensión máxima espacial que puede tener la zona en donde se construirá la cuenca atmosférica.

La delimitación de la cuenca se realizó aplicando un criterio de conteo de trayectorias, considerando como límite aquellas caras de los polígonos atravesadas por al menos cuatro líneas, equivalentes al 16% del total, trazando un “polígono de color azul” que delimita la cuenca para cada día analizado, con respecto a los polígonos de referencia. Finalmente, la información fue representada en un sistema de información geográfica, integrando las trayectorias, los tres octágonos concéntricos, la cuenca delimitada (según el criterio de porcentaje de trayectorias) y las concentraciones de NO<sub>2</sub>, junto con las capas correspondientes al área de estudio y el Modelo Digital de Elevación de 15 metros.

En este trabajo se establece la temporada de invierno en los meses de diciembre, enero y febrero, la temporada de primavera en marzo, abril y mayo, la temporada de verano en junio, julio y agosto y la temporada de otoño en septiembre octubre y noviembre, así mismo se seleccionaron cuatro semanas, cada una correspondiente a cada temporada del año (tabla 3), dentro del periodo 2019-2021, ya que la información satelital y de las estaciones terrestres de NO<sub>2</sub> está disponible para ambas fuentes de datos en ese periodo, tomando en cuenta que el sensor satelital pasa por la zona de estudio alrededor de las 13 horas, por lo que se descargó la información meteorológica para el mismo periodo.

|                     |                                    |
|---------------------|------------------------------------|
| Semana de invierno  | Del 02 al 08 de diciembre de 2019  |
| Semana de primavera | Del 22 al 28 de mayo de 2020       |
| Semana de verano    | Del 03 al 09 de julio de 2020      |
| Semana de otoño     | Del 08 al 14 de septiembre de 2021 |

*Tabla 3. Semanas analizadas en el periodo 2019-2021.*

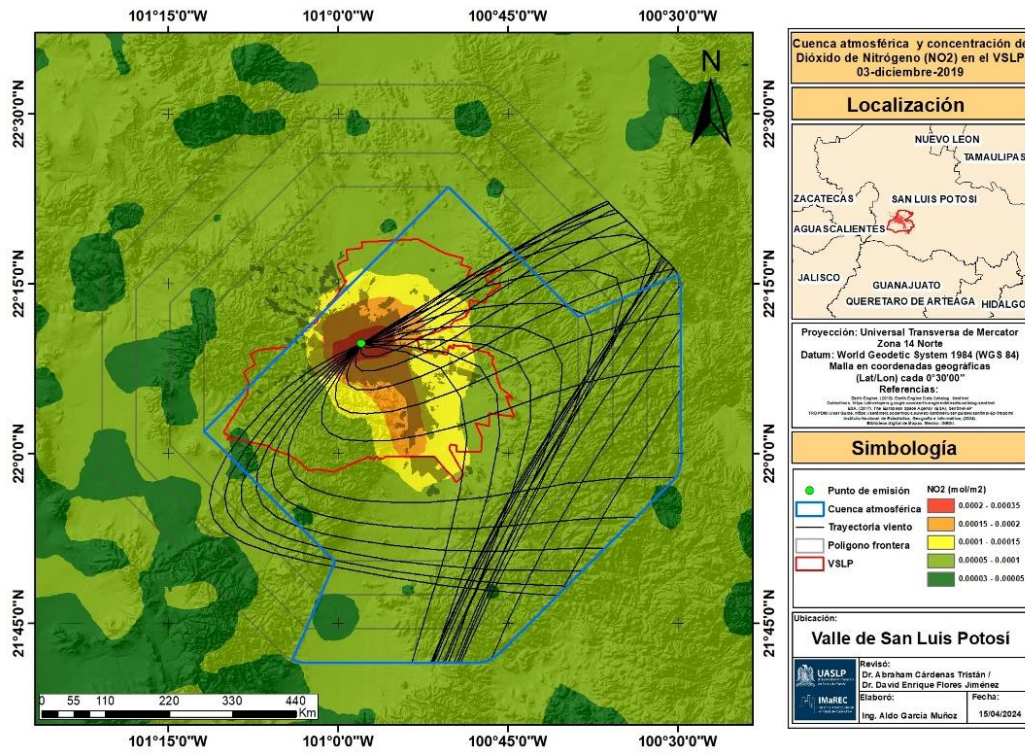


Figura 9. Cuenca atmosférica y concentración de NO<sub>2</sub> durante la semana de invierno en 2019.

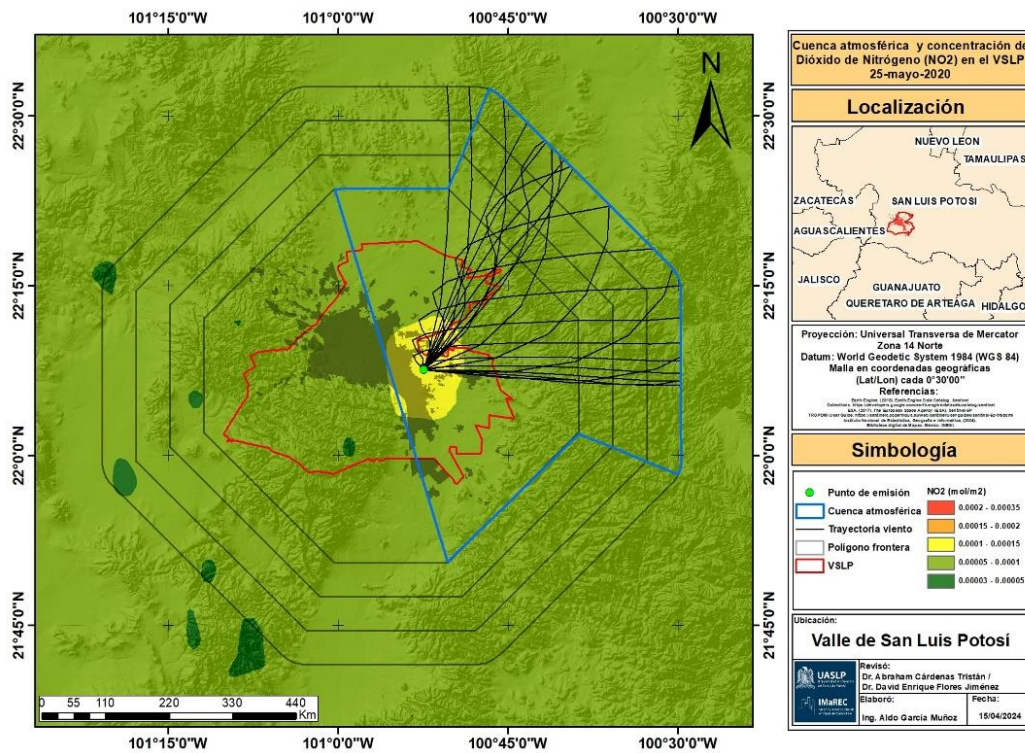


Figura 10. Cuenca atmosférica y concentración de NO<sub>2</sub> durante la semana de primavera en 2020.

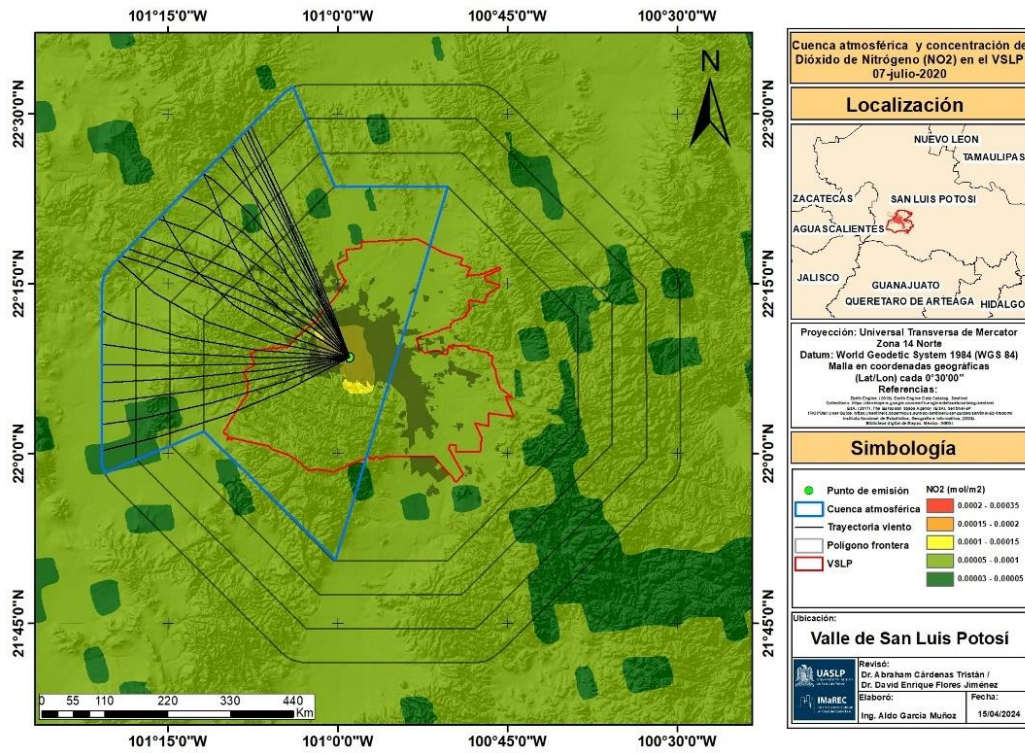


Figura 11. Cuenca atmosférica y concentración de NO<sub>2</sub> durante la semana de verano en 2020.

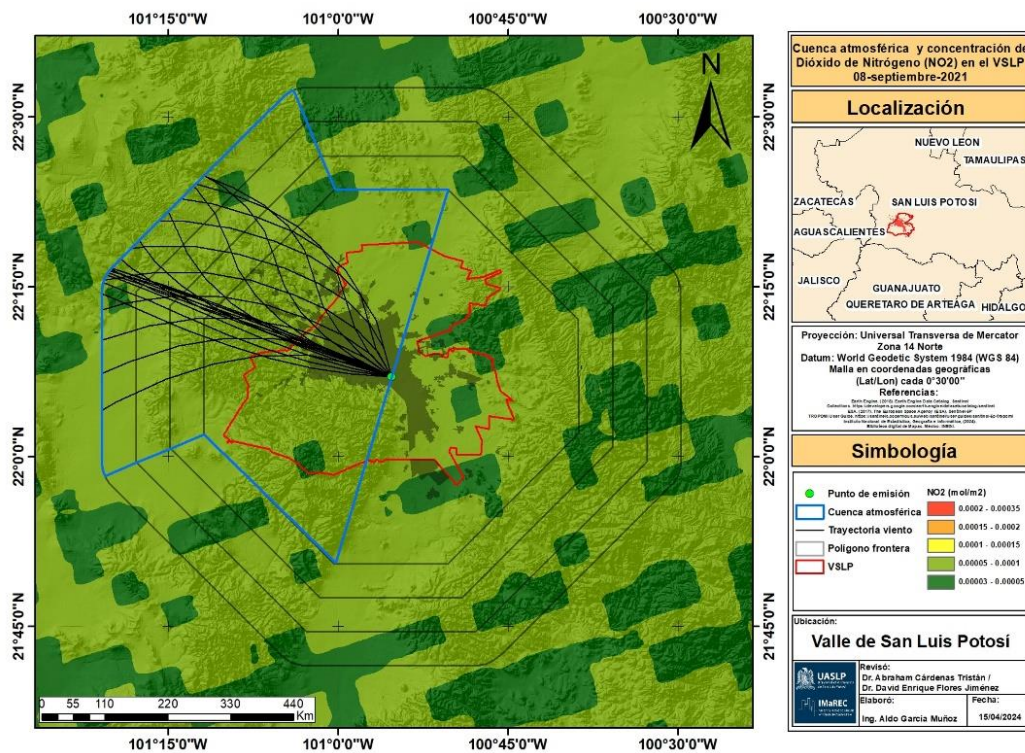


Figura 12. Cuenca atmosférica y concentración de NO<sub>2</sub> durante la semana de otoño en 2021.

La figura 9 presenta la cuenca atmosférica para la semana de la temporada de invierno del 2019, los vientos tienen su trayectoria hacia el sureste, cubriendo 5 caras y la mayor parte del VSLP, los niveles de NO<sub>2</sub> más elevados detectados por el satélite en la parte central de la zona conurbada pueden ser un indicador de altas concentraciones en dicho sitio. Durante la semana de la temporada de primavera del 2020 (figura 10) los vientos tienen su trayectoria hacia el noreste, cubriendo 2 caras y la mitad del VSLP, los niveles de NO<sub>2</sub> más elevados detectados por el satélite en el noreste de la zona conurbada pueden ser un indicador de concentraciones medias. Para la semana de verano del 2020 (figura 11) los vientos tienen su trayectoria hacia el noroeste, cubriendo 2 caras y la mitad del VSLP, los niveles de NO<sub>2</sub> más elevados detectados por el satélite en la parte central de la zona conurbada pueden ser un indicador de una concentración media al centro y noreste de la zona conurbada. Finalmente, para la semana de otoño, (figura 12) los vientos tienen su trayectoria hacia el noroeste, cubriendo 2 caras y la mitad del VSLP, se detectaron niveles de NO<sub>2</sub> medios-bajos por el satélite en la mayor parte de la zona de estudio.

## 2.4.4 Cuencas atmosféricas de fechas con mayor concentración de NO<sub>2</sub>.

A continuación, se presentan 6 cuencas atmosféricas que representan los días con mayor concentración de NO<sub>2</sub> durante el periodo analizado de 2019-2021, las cuales en su mayoría se presentaron en la temporada de invierno correspondientes a los meses de diciembre, enero y febrero.

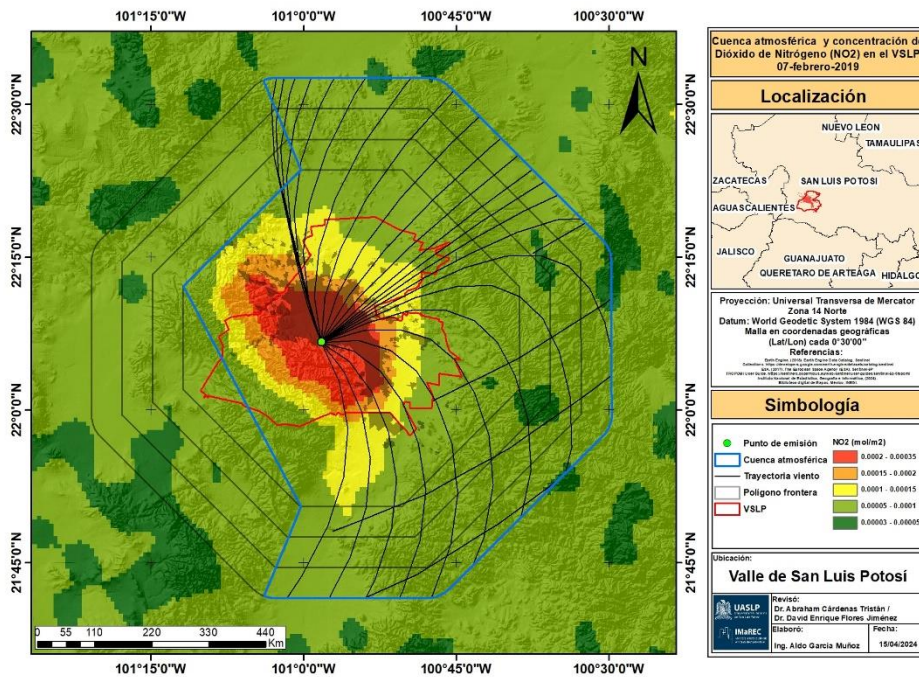


Figura 13. Cuenca atmosférica y concentración de NO<sub>2</sub> del 07 de febrero de 2019.

La figura 13 presenta la cuenca atmosférica de día 07 de febrero de 2019, donde los vientos tienen su trayectoria hacia el norte, noreste, este, sureste y sur durante las 24 horas del día, cubriendo 5 caras y cubriendo la mayor parte del VSLP, los niveles de NO<sub>2</sub> más elevados detectados por el satélite en la parte central del VSLP pueden ser un indicador de altas concentraciones en dicho sitio.

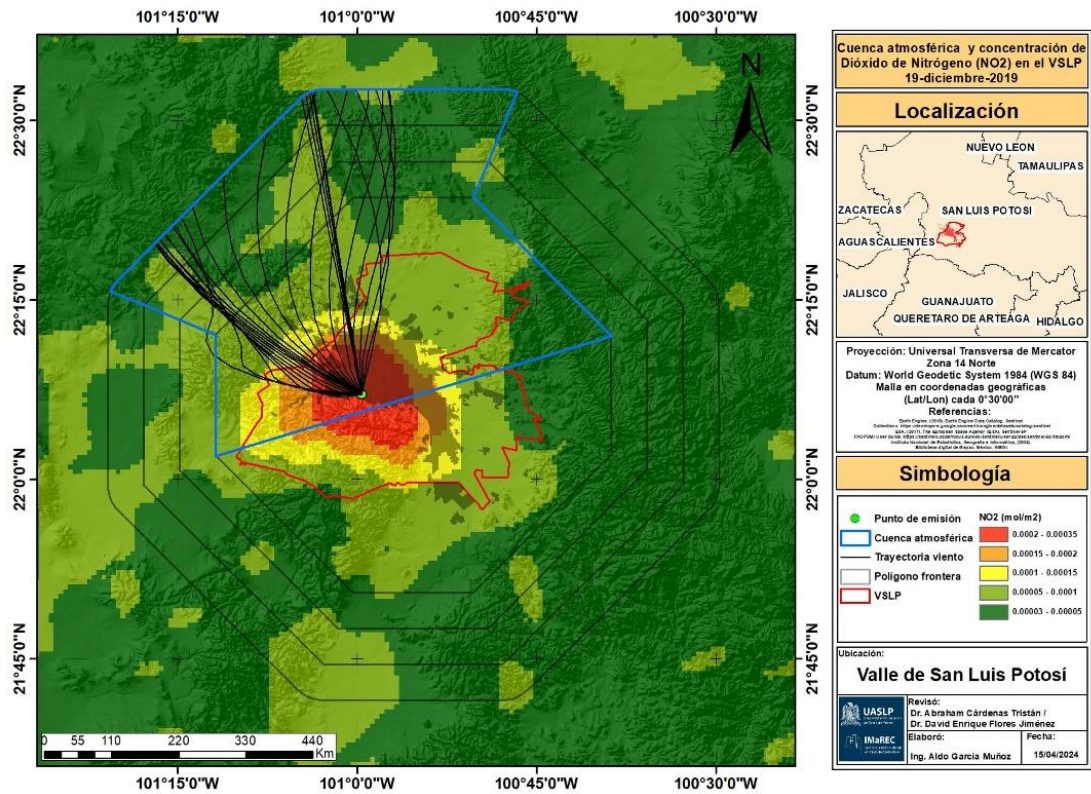


Figura 14. Cuenca atmosférica y concentración de NO<sub>2</sub> del 19 de diciembre de 2019.

La figura 14 muestra la cuenca atmosférica de día 19 de diciembre de 2019, donde los vientos tienen su trayectoria hacia el noroeste y norte, cubriendo 2 caras y la mitad del VSLP, los niveles de NO<sub>2</sub> más elevados detectados por el satélite en la parte centro norte de la zona conurbada pueden ser un indicador de altas concentraciones en dicho sitio.

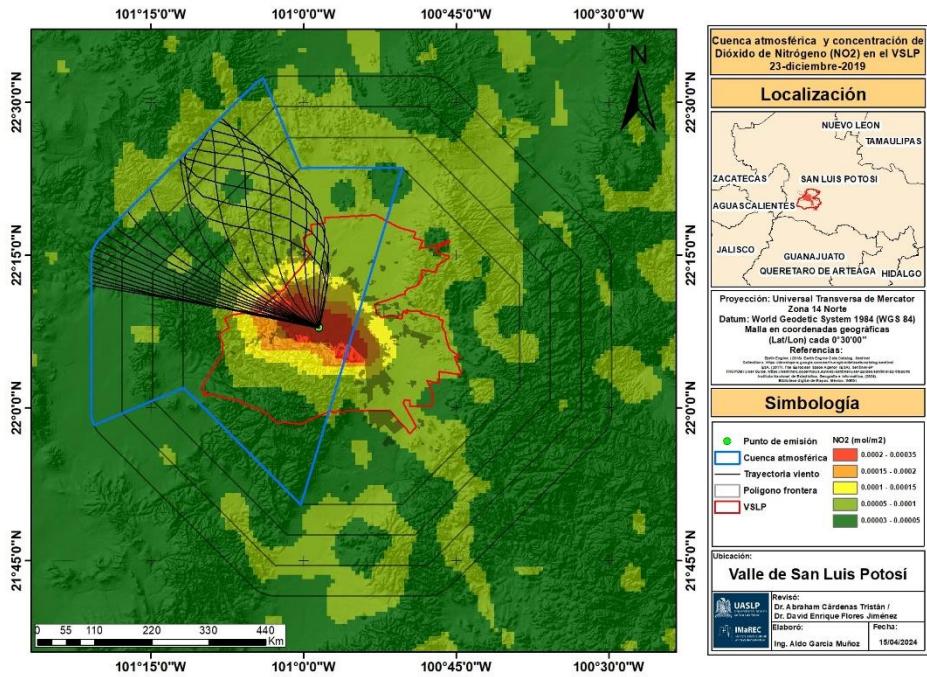


Figura 15. Cuenca atmosférica y concentración de  $\text{NO}_2$  del 23 de diciembre de 2019.

La figura 15 presenta la cuenca atmosférica de día 23 de diciembre de 2019, con vientos con trayectoria hacia el oeste y noroeste, cubriendo 2 caras y la mitad del VSLP, los niveles de  $\text{NO}_2$  más elevados detectados por el satélite en la parte central de la zona conurbada pueden ser un indicador de altas concentraciones en esa área.

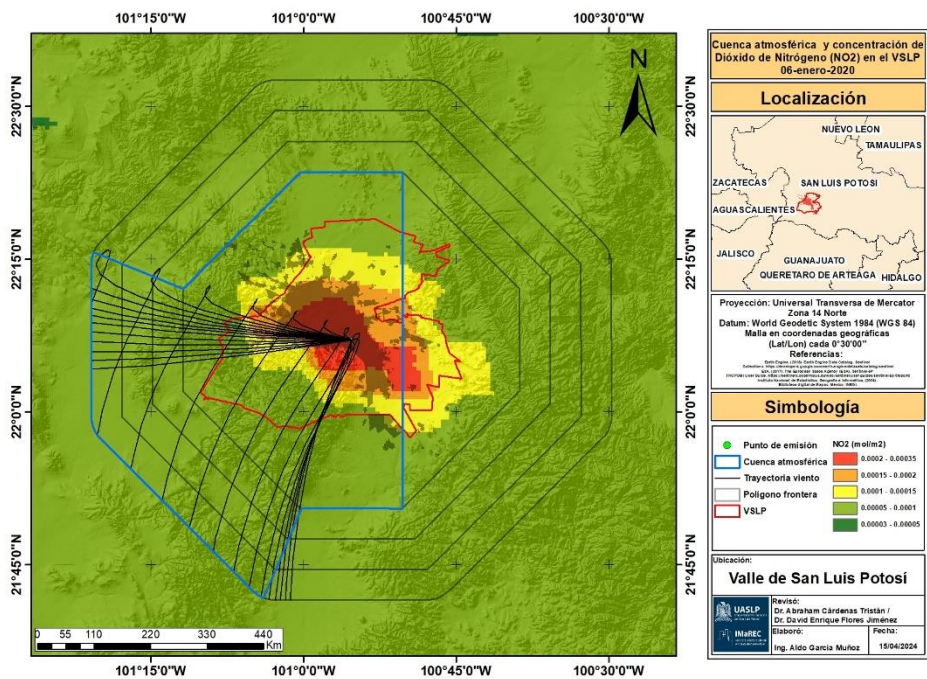


Figura 16. Cuenca atmosférica y concentración de  $\text{NO}_2$  del 06 de enero de 2020.

La figura 16 presenta la cuenca atmosférica de día 06 de enero de 2020, donde los vientos tienen una trayectoria hacia el oeste y suroeste, cubriendo 2 caras y la mayor parte del VSLP, los niveles de NO<sub>2</sub> más elevados detectados por el satélite en la parte central de la zona conurbada pueden ser un indicador de altas concentraciones en esa región.

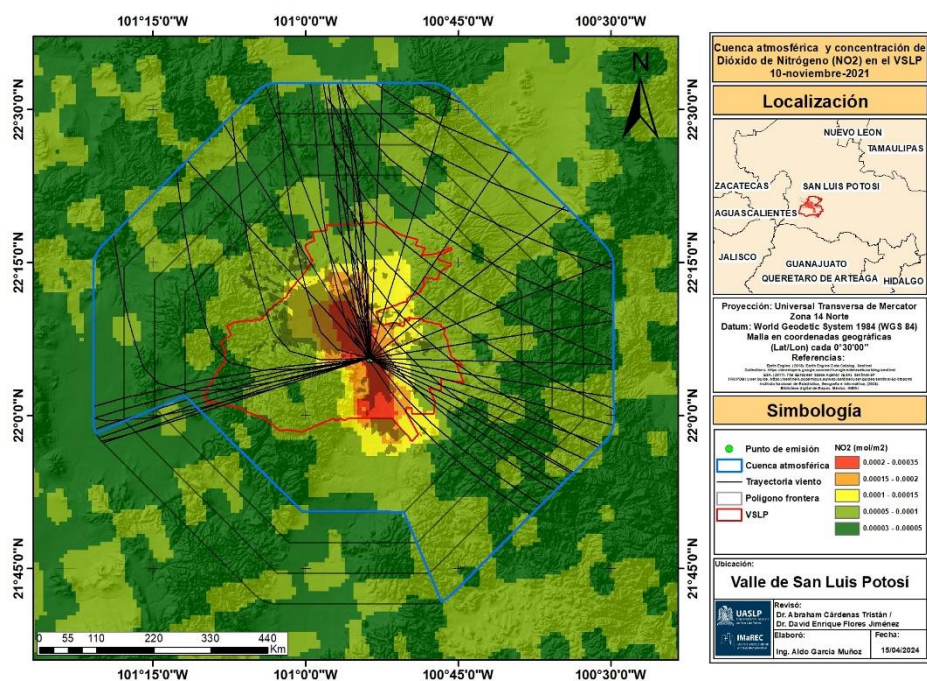


Figura 17. Cuenca atmosférica y concentración de NO<sub>2</sub> del 10 de noviembre de 2021.

La figura 17 muestra la cuenca atmosférica de día 10 de noviembre de 2021, la única de las seis cuencas con mayor concentración de NO<sub>2</sub> que se presentó durante la temporada de otoño, donde los vientos tienen una trayectoria hacia el oeste, noroeste, norte, noreste y este, cubriendo 6 caras y completamente el VSLP, los niveles de NO<sub>2</sub> más elevados detectados por el satélite en la parte central de la mancha urbana pueden ser un indicador de altas concentraciones en dicha zona.

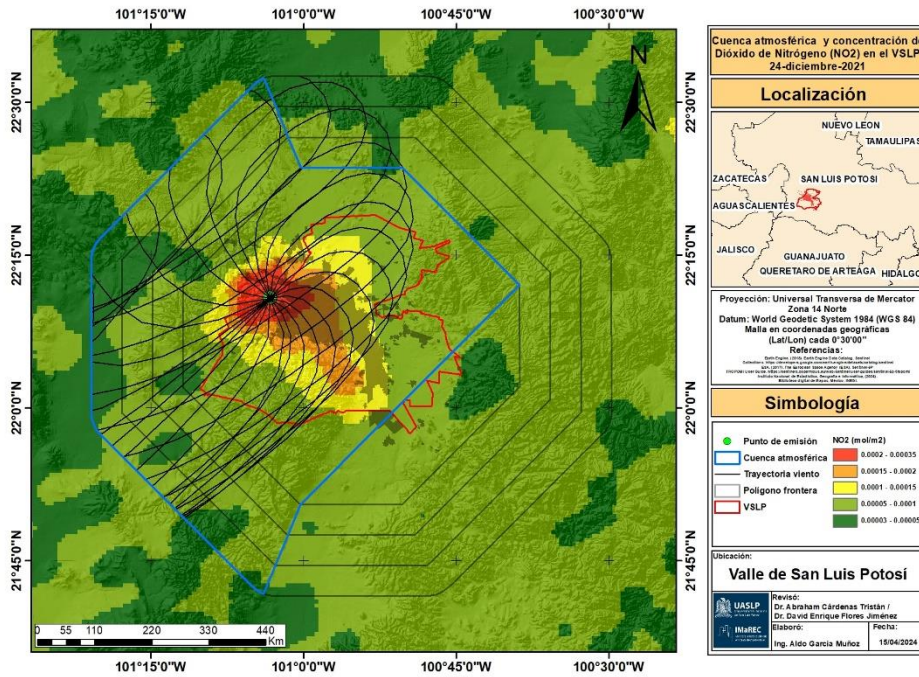


Figura 18. Cuenca atmosférica y concentración de NO<sub>2</sub> del 24 de diciembre de 2021.

La figura 18 presenta la cuenca atmosférica de día 24 de diciembre de 2021, donde los vientos tienen una trayectoria hacia el oeste, noroeste y suroeste, cubriendo 3 caras y casi por completo el VSLP, los niveles de NO<sub>2</sub> más elevados detectados por el satélite en la parte noroeste de la zona de estudio pueden ser un indicador de altas concentraciones en esa región.

### 3. CAPÍTULO 2. CORRELACIÓN DE PEARSON DE DATOS SATELITALES DEL SENSOR REMOTO SENTINEL-5P Y ESTACIONES TERRESTRES DE MONITOREO DE CALIDAD DEL AIRE (SEGAM).

La correlación de Pearson se realizó con los datos obtenidos del Satélite Sentinel 5-P TROPOMI de Dióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>) en mol/m<sup>2</sup>, como variable dependiente y la concentración de NO<sub>2</sub> en ppm capturado en la caseta de monitoreo de la calidad del aire de la Ciudad de San Luis Potosí y Zona Conurbada como variable independiente, estos datos son validados por la Secretaría de Ecología y Gestión Ambiental (SEGAM), así mismo se realizó el mismo ejercicio utilizando NO<sub>2</sub> de las concentraciones capturadas en cada una de las casetas de monitoreo como variable dependiente y las variables climáticas disponibles de cada estación como variable independiente.

La información satelital de obtenida del Satelital se descargó mediante la plataforma de análisis espacial basada en la nube Google Earth Engine, que permite al usuario visualizar, analizar y descargar imágenes satelitales en distintos formatos, en este caso la información se descargó en formato TIFF para después cada imagen (Ráster) transformarla a formato vectorial (Shapefile), es decir, puntos con un determinado valor representativo de cada pixel en el que se ubica cada una de las 4 estaciones de monitoreo. El valor obtenido de cada pixel se correlaciono con cada una de las variables disponibles a las 13:00 horas ya que el satélite pasa por la zona de interés alrededor de esa hora. Se determino analizar una semana por cada temporada del año en el periodo de 2019-2021 como se mencionó anteriormente.

Cada una de las correlaciones se procesaron en RStudio que es un entorno de desarrollo integrado para el lenguaje de programación R, dedicado a la computación estadística y representación de gráficos, por ultimo los resultados se interpretaron de acuerdo con la siguiente figura, en donde se muestra la escala de Milton.

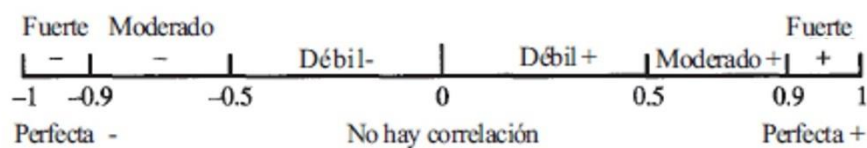


Figura 19. Interpretación del coeficiente de correlación de Pearson, estimado  $r$ .

La figura 19. proporciona una escala sugerida para interpretar la correlación  $r$ . De acuerdo con la escala de Milton, por ejemplo, un valor  $-0.33$  se describe como una correlación negativa débil y se asume que los valores que son iguales a uno, de los puntos de corte de la escala, se sitúan en la clasificación superior. Por ejemplo, una correlación de  $0.5$  se considera una correlación positiva moderada, mientras que una correlación de  $-0.9$  se considera una correlación negativa fuerte (Milton, 2001).

### 3.1 Correlación de Pearson de NO<sub>2</sub> del Sensor Sentinel-5P y NO<sub>2</sub> de las estaciones de monitoreo de calidad del aire de la SEGAM registrado a las 13 horas en la semana de invierno 2019.

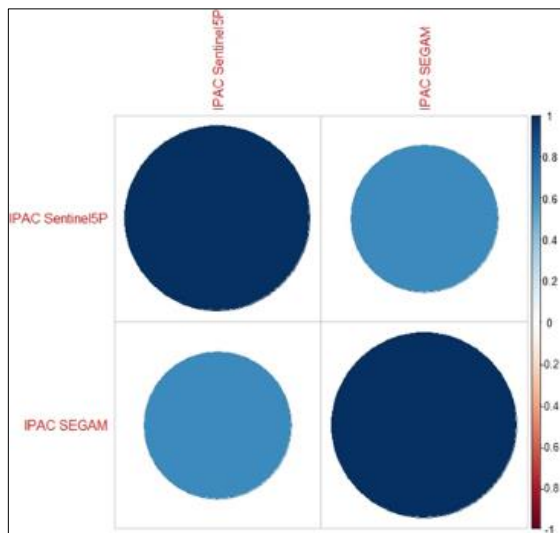


Figura 20. Correlación de Pearson de NO<sub>2</sub> para la estación IPAC en la semana de invierno.

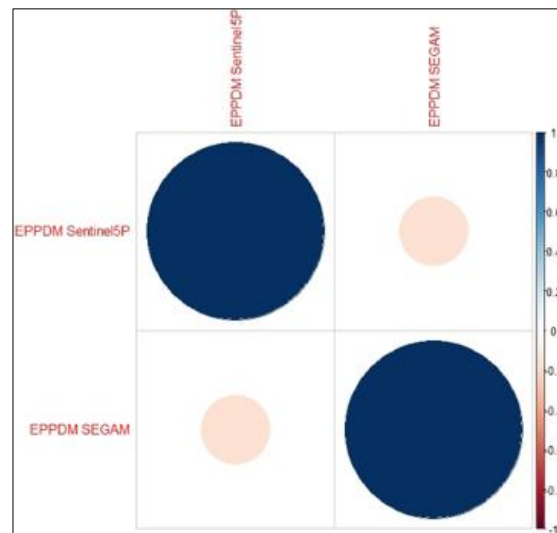


Figura 21. Correlación de Pearson de NO<sub>2</sub> para la estación EPPDM en la semana de invierno.

|                  | IPAC Sentinel-5P | IPAC SEGAM |
|------------------|------------------|------------|
| IPAC Sentinel-5P | 1.00             | 0.63       |
| IPAC SEGAM       | 0.63             | 1.00       |

Tabla 4. Matriz de correlación de Pearson para la estación IPAC en la semana de invierno.

|                   | EPPDM Sentinel-5P | EPPDM SEGAM |
|-------------------|-------------------|-------------|
| EPPDM Sentinel-5P | 1.00              | -0.15       |
| EPPDM SEGAM       | -0.15             | 1.00        |

Tabla 5. Matriz de correlación de Pearson para la estación EPPDM en la semana de invierno.

La figura 20 muestra la correlación entre las concentraciones de NO<sub>2</sub> en el sensor TROPOMI como variable dependiente y la de la caseta de monitoreo IPAC como variable independiente durante la semana de invierno del año 2019, en este caso la correlación fue de 0.63 (tabla 4) lo que representa una correlación moderada positiva en la escala de Milton y un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> de 0.39 es decir 39% de la variabilidad observada en los datos satelitales puede ser explicada por los datos de capturados en la superficie y el 61% restante se atribuye a otros factores no considerados en este modelo.

La figura 21 presenta la correlación entre las concentraciones de NO<sub>2</sub> en el sensor TROPOMI como variable dependiente y la de la caseta de monitoreo EPPDM como variable independiente durante la semana de invierno del año 2019, en este caso la correlación fue de -0.15 (tabla 5) lo que representa una correlación débil negativa en la escala de Milton y un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> de 0.02 (2.2%) esto sugiere que no existe una relación lineal significativa entre ambas mediciones y que la variabilidad de los datos satelitales se atribuyen a otros factores que no se incluyen en este análisis.

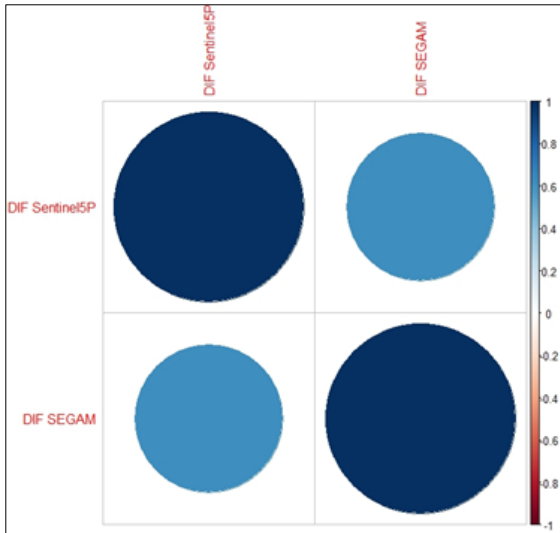


Figura 22. Correlación de Pearson de NO<sub>2</sub> para la estación DIF en la semana de invierno.

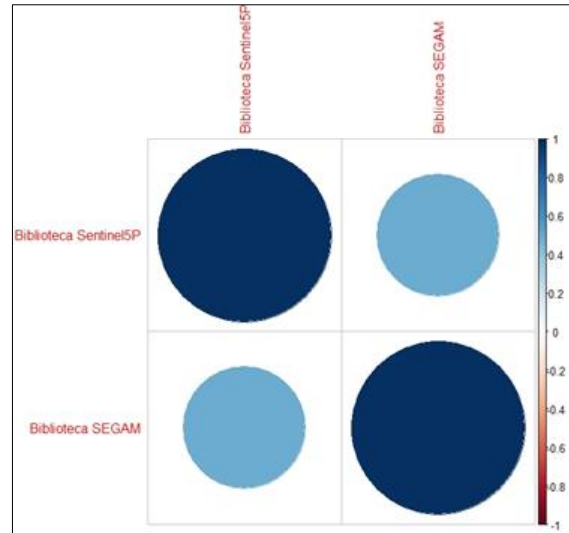


Figura 23. Correlación de Pearson de NO<sub>2</sub> para la estación Biblioteca en la semana de invierno.

|                 | DIF Sentinel-5P | DIF SEGAM |
|-----------------|-----------------|-----------|
| DIF Sentinel-5P | 1.00            | 0.61      |
| DIF SEGAM       | 0.61            | 1.00      |

Tabla 6. Matriz de correlación de Pearson para la estación DIF en la semana de invierno.

|                        | Biblioteca Sentinel-5P | Biblioteca SEGAM |
|------------------------|------------------------|------------------|
| Biblioteca Sentinel-5P | 1.00                   | 0.49             |
| Biblioteca SEGAM       | 0.49                   | 1.00             |

Tabla 7. Matriz de correlación de Pearson para la estación Biblioteca en la semana de invierno.

La figura 22 muestra la correlación entre las concentraciones de NO<sub>2</sub> en el sensor TROPOMI como variable dependiente y la de la caseta de monitoreo DIF como variable independiente durante la semana de invierno del año 2019, en este caso la correlación fue de 0.61 (tabla 6) lo que representa una correlación moderada positiva en la escala de Milton y un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> de 0.37 es decir 37% de la variabilidad observada en los datos satelitales puede ser explicada por los datos de capturados en la superficie y el 63% restante se atribuye a otros factores no considerados en este modelo.

La figura 23 muestra la correlación entre las concentraciones de NO<sub>2</sub> en el sensor TROPOMI como variable dependiente y la de la caseta de monitoreo Biblioteca como variable independiente durante la semana de invierno del año 2019, en este caso la correlación fue de 0.49 (tabla 7) lo que representa una correlación débil positiva en la escala de Milton y un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> de 0.24 es decir 24% de la variabilidad observada en los datos satelitales puede ser explicada por los datos de capturados en la superficie y el 76% restante se atribuye a otros factores no considerados en este modelo.

### 3.2 Correlación de Pearson de NO<sub>2</sub> del Sensor Sentinel-5P y NO<sub>2</sub> de las estaciones de monitoreo de calidad del aire de la SEGAM registrado a las 13 horas en la semana de primavera 2020.

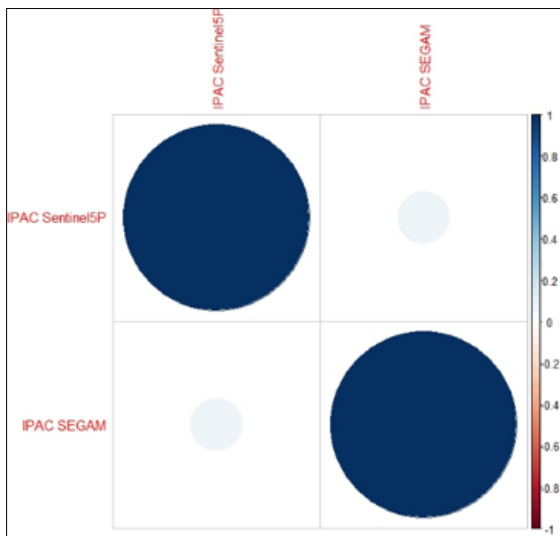


Figura 24. Gráfico de correlación de Pearson de NO<sub>2</sub> para la estación IPAC en la semana de primavera.

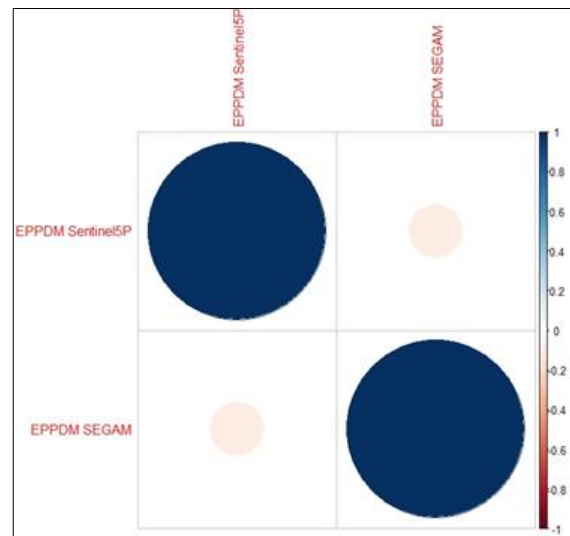


Figura 25. Gráfico de correlación de Pearson de NO<sub>2</sub> para la estación EPPDM en la semana de primavera.

|                  | IPAC Sentinel-5P | IPAC SEGAM |
|------------------|------------------|------------|
| IPAC Sentinel-5P | 1.00             | 0.079      |
| IPAC SEGAM       | 0.079            | 1.00       |

Tabla 8. Matriz de correlación de Pearson para la estación IPAC en la semana de primavera.

|                   | EPPDM Sentinel-5P | EPPDM SEGAM |
|-------------------|-------------------|-------------|
| EPPDM Sentinel-5P | 1.00              | -0.091      |
| EPPDM SEGAM       | -0.091            | 1.00        |

Tabla 9. Matriz de correlación de Pearson para la estación EPPDM en la semana de primavera.

La figura 24 muestra la correlación entre las concentraciones de NO<sub>2</sub> en el sensor TROPOMI como variable dependiente y la de la caseta de monitoreo IPAC como variable independiente durante la semana de primavera del año 2020, en este caso la correlación fue de 0.079 (tabla 8) lo que representa una correlación débil positiva en la escala de Milton y un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> de 0.006 (0.6%) esto sugiere que no existe una relación lineal significativa entre ambas mediciones y que la variabilidad de los datos satelitales se atribuyen a otros factores que no se incluyen en este análisis.

La figura 25 muestra la correlación entre las concentraciones de NO<sub>2</sub> en el sensor TROPOMI como variable dependiente y la de la caseta de monitoreo EPPDM como variable independiente durante la semana de primavera del año 2020, en este caso la correlación fue de -0.091 (tabla 9) lo que representa una correlación débil negativa en la escala de Milton y un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> de 0.008 (0.8%) esto sugiere que no existe una relación lineal significativa entre ambas mediciones y que la variabilidad de los datos satelitales se atribuyen a otros factores que no se incluyen en este análisis.

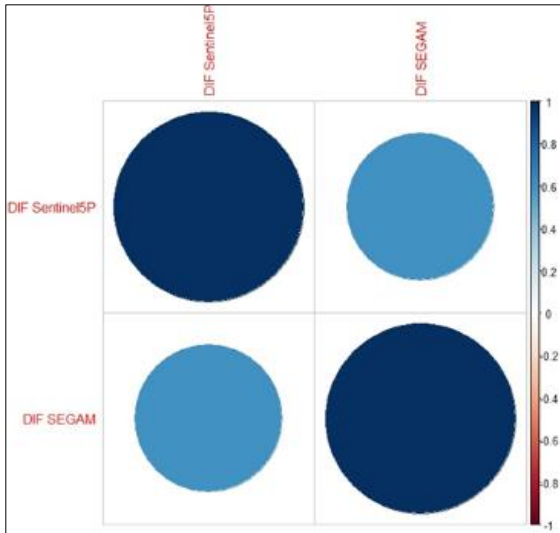


Figura 26. Gráfico de correlación de Pearson de NO<sub>2</sub> para la estación DIF en la semana de primavera.

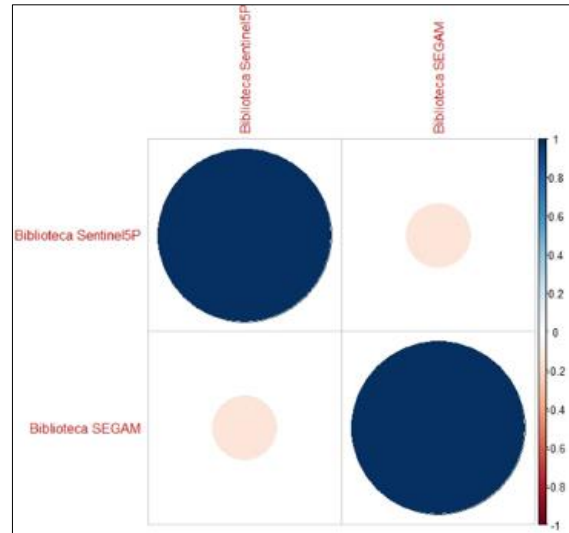


Figura 27. Correlación de Pearson de NO<sub>2</sub> para la estación Biblioteca en la semana de primavera.

|                 | DIF Sentinel-5P | DIF SEGAM |
|-----------------|-----------------|-----------|
| DIF Sentinel-5P | 1.00            | 0.60      |
| DIF SEGAM       | 0.60            | 1.00      |

Tabla 10. Matriz de correlación de Pearson para la estación DIF en la semana de primavera.

|                        | Biblioteca Sentinel-5P | Biblioteca SEGAM |
|------------------------|------------------------|------------------|
| Biblioteca Sentinel-5P | 1.00                   | -0.13            |
| Biblioteca SEGAM       | -0.13                  | 1.00             |

Tabla 11. Matriz de correlación de Pearson para la estación Biblioteca en la semana de primavera.

La figura 26 muestra la correlación entre las concentraciones de NO<sub>2</sub> en el sensor TROPOMI como variable dependiente y la de la caseta de monitoreo DIF como variable independiente durante la semana de primavera del año 2020, en este caso la correlación fue de 0.60 (tabla 10) lo que representa una correlación moderada positiva en la escala de Milton y un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> de 0.36 es decir 36% de la variabilidad observada en los datos satelitales puede ser explicada por los datos de capturados en la superficie y el 64% restante se atribuye a otros factores no considerados en este modelo.

La figura 27 muestra la correlación entre las concentraciones de NO<sub>2</sub> en el sensor TROPOMI como variable dependiente y la de la caseta de monitoreo Biblioteca como variable independiente durante la semana de primavera del año 2020, en este caso la correlación fue de -0.13 (tabla 11) lo que representa una correlación débil negativa en la escala de Milton y un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> de 0.01 (1.9%) esto sugiere que no existe una relación lineal significativa entre ambas mediciones y que la variabilidad de los datos satelitales se atribuyen a otros factores que no se incluyen en este análisis.

### 3.3 Correlación de Pearson de NO<sub>2</sub> del Sensor Sentinel-5P y NO<sub>2</sub> de las estaciones de monitoreo de calidad del aire de la SEGAM registrado a las 13 horas en la semana de verano 2020.

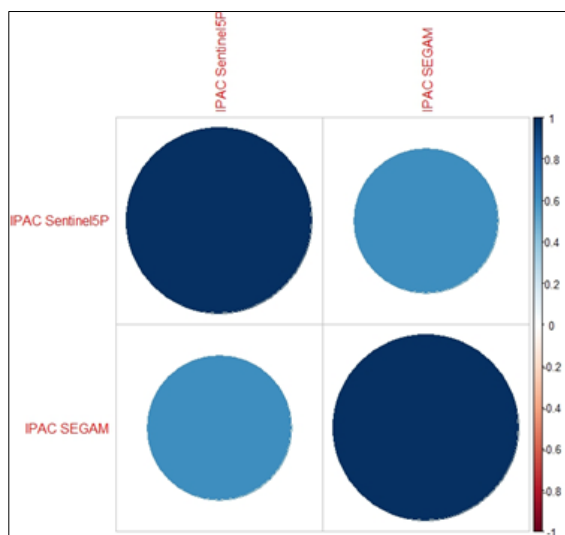


Figura 28. Correlación de Pearson de NO<sub>2</sub> para la estación IPAC en la semana de verano.

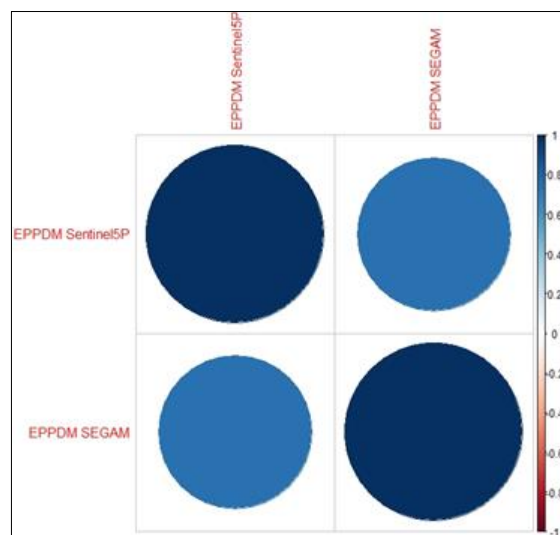


Figura 29. Correlación de Pearson de NO<sub>2</sub> para la estación EPPDM en la semana de verano.

|                  | IPAC Sentinel-5P | IPAC SEGAM |
|------------------|------------------|------------|
| IPAC Sentinel-5P | 1.00             | 0.74       |
| IPAC SEGAM       | 0.74             | 1.00       |

Tabla 12. Matriz de correlación de Pearson para la estación IPAC en la semana de verano.

|                   | EPPDM Sentinel-5P | EPPDM SEGAM |
|-------------------|-------------------|-------------|
| EPPDM Sentinel-5P | 1.00              | 0.74        |
| EPPDM SEGAM       | 0.74              | 1.00        |

Tabla 13. Matriz de correlación de Pearson para la estación EPPDM en la semana de verano.

La figura 28 muestra la correlación entre las concentraciones de NO<sub>2</sub> en el sensor TROPOMI como variable dependiente y la de la caseta de monitoreo IPAC como variable independiente durante la semana de verano del año 2020, en este caso la correlación fue de 0.74 (tabla 12) lo que representa una correlación moderada positiva en la escala de Milton y un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> de 0.54 es decir 54% de la variabilidad observada en los datos satelitales puede ser explicada por los datos de capturados en la superficie y el 46% restante se atribuye a otros factores no considerados en este modelo.

La figura 29 muestra la correlación entre las concentraciones de NO<sub>2</sub> en el sensor TROPOMI como variable dependiente y la de la caseta de monitoreo EPPDM como variable independiente durante la semana de verano del año 2020, en este caso la correlación fue de 0.74 (tabla 13) lo que representa una correlación moderada positiva en la escala de Milton y un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> de es decir 54% de la variabilidad observada en los datos satelitales puede ser explicada por los datos de capturados en la superficie y el 46% restante se atribuye a otros factores no considerados en este modelo.

### 3.4 Correlación de Pearson de NO<sub>2</sub> del Sensor Sentinel-5P y NO<sub>2</sub> de las estaciones de monitoreo de calidad del aire de la SEGAM registrado a las 13 horas en la semana de otoño 2021.

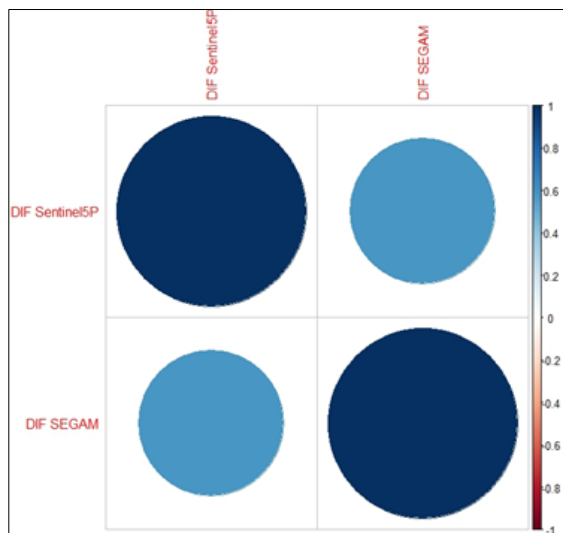


Figura 30. Correlación de Pearson de NO<sub>2</sub> para la estación DIF en la semana de verano.

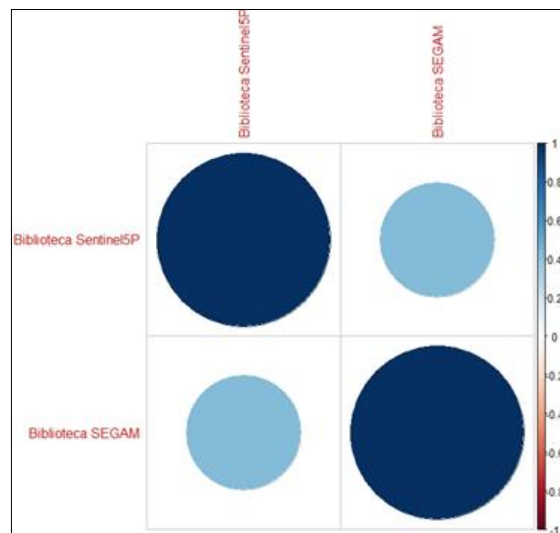


Figura 31. Correlación de Pearson de NO<sub>2</sub> para la estación Biblioteca en la semana de verano.

|                 | DIF Sentinel-5P | DIF SEGAM |
|-----------------|-----------------|-----------|
| DIF Sentinel-5P | 1.00            | 0.58      |
| DIF SEGAM       | 0.58            | 1.00      |

Tabla 14. Matriz de correlación de Pearson para la estación DIF en la semana de verano.

|                        | Biblioteca Sentinel-5P | Biblioteca SEGAM |
|------------------------|------------------------|------------------|
| Biblioteca Sentinel-5P | 1.00                   | 0.43             |
| Biblioteca SEGAM       | 0.43                   | 1.00             |

Tabla 15. Matriz de correlación de Pearson para la estación Biblioteca en la semana de verano.

La figura 30 muestra la correlación entre las concentraciones de NO<sub>2</sub> en el sensor TROPOMI como variable dependiente y la de la caseta de monitoreo DIF como variable independiente durante la semana de verano del año 2020, en este caso la correlación fue de 0.58 (tabla 14) lo que representa una correlación moderada positiva en la escala de Milton y un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> de 0.33 es decir 33% de la variabilidad observada en los datos satelitales puede ser explicada por los datos de capturados en la superficie y el 67% restante se atribuye a otros factores no considerados en este modelo.

La figura 31 muestra la correlación entre las concentraciones de NO<sub>2</sub> en el sensor TROPOMI como variable dependiente y la de la caseta de monitoreo Biblioteca como variable independiente durante la semana de verano del año 2020, en este caso la correlación fue de 0.43 (tabla 15) lo que representa una correlación débil positiva en la escala de Milton y un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> de 0.18 es decir 18% de la variabilidad observada en los datos satelitales puede ser explicada por los datos de capturados en la superficie y el 82% restante se atribuye a otros factores no considerados en este modelo.

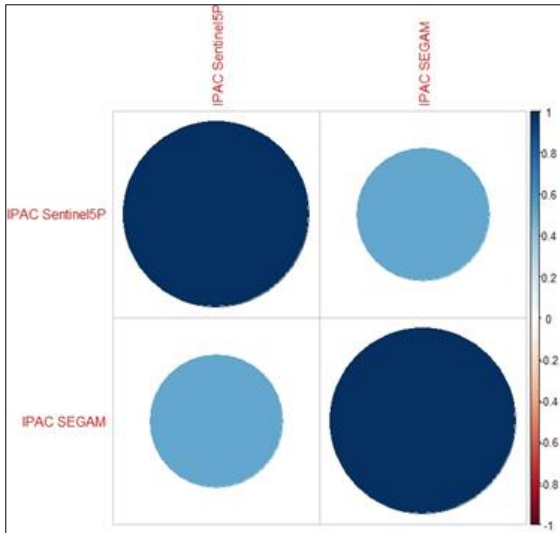


Figura 32. Correlación de Pearson de NO<sub>2</sub> para la estación IPAC en la semana de otoño.

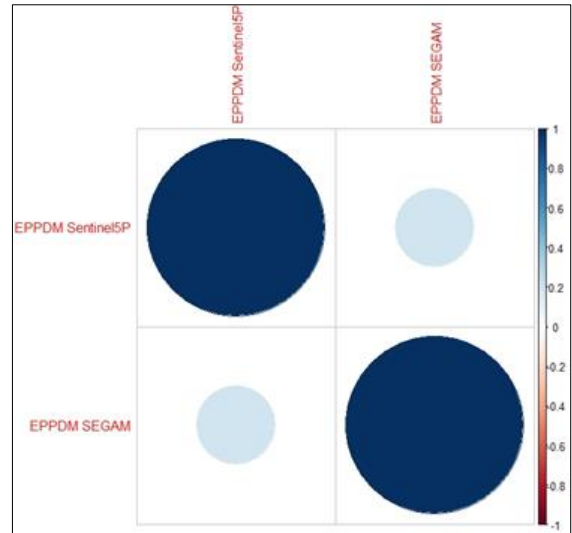


Figura 33. Correlación de Pearson de NO<sub>2</sub> para la estación EPPDM en la semana de otoño.

|                  | IPAC Sentinel-5P | IPAC SEGAM |
|------------------|------------------|------------|
| IPAC Sentinel-5P | 1.00             | 0.51       |
| IPAC SEGAM       | 0.51             | 1.00       |

Tabla 16. Matriz de correlación de Pearson para la estación IPAC en la semana de verano.

|                   | EPPDM Sentinel-5P | EPPDM SEGAM |
|-------------------|-------------------|-------------|
| EPPDM Sentinel-5P | 1.00              | 0.19        |
| EPPDM SEGAM       | 0.19              | 1.00        |

Tabla 17. Matriz de correlación de Pearson para la estación EPPDM en la semana de verano.

La figura 32 muestra la correlación entre las concentraciones de NO<sub>2</sub> en el sensor TROPOMI como variable dependiente y la de la caseta de monitoreo IPAC como variable independiente durante la semana de otoño del año 2021, en este caso la correlación fue de 0.51 (tabla 16) lo que representa una correlación moderada positiva en la escala de Milton y un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> de 0.26 es decir 26% de la variabilidad observada en los datos satelitales puede ser explicada por los datos de capturados en la superficie y el 74% restante se atribuye a otros factores no considerados en este modelo.

La figura 33 muestra la correlación entre las concentraciones de NO<sub>2</sub> en el sensor TROPOMI como variable dependiente y la de la caseta de monitoreo EPPDM como variable independiente durante la semana de otoño del año 2021, en este caso la correlación fue de 0.19 (tabla 17) lo que representa una correlación débil positiva en la escala de Milton y un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> de 0.036 (3.61%) esto sugiere que no existe una relación lineal significativa entre ambas mediciones y que la variabilidad de los datos satelitales se atribuyen a otros factores que no se incluyen en este análisis.

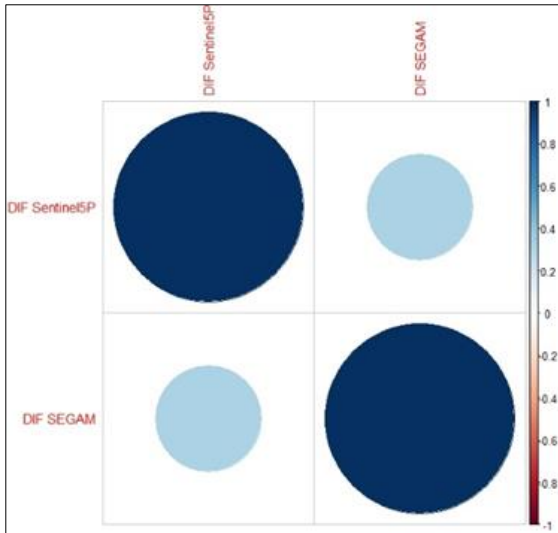


Figura 34. Correlación de Pearson de NO<sub>2</sub> para la estación DIF en la semana de otoño.

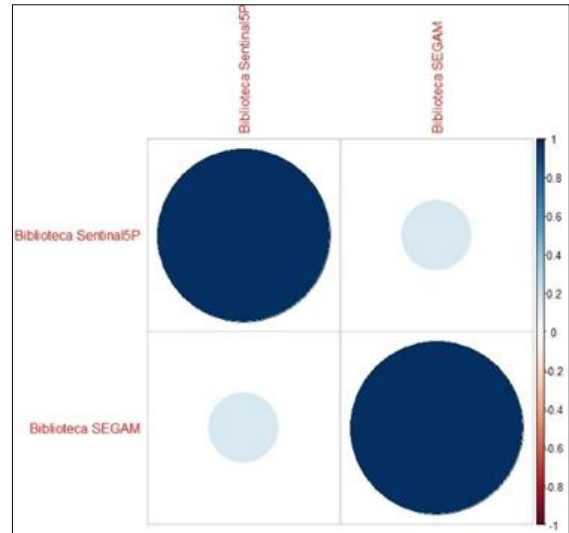


Figura 35. Correlación de Pearson de NO<sub>2</sub> para la estación Biblioteca en la semana de otoño.

|                 | DIF Sentinel-5P | DIF SEGAM |
|-----------------|-----------------|-----------|
| DIF Sentinel-5P | 1.00            | 0.51      |
| DIF SEGAM       | 0.51            | 1.00      |

Tabla 18. Matriz de correlación de Pearson para la estación DIF en la semana de verano.

|                        | Biblioteca Sentinel-5P | Biblioteca SEGAM |
|------------------------|------------------------|------------------|
| Biblioteca Sentinel-5P | 1.00                   | 0.19             |
| Biblioteca SEGAM       | 0.19                   | 1.00             |

Tabla 19. Matriz de correlación de Pearson para la estación Biblioteca en la semana de verano.

La figura 34 muestra la correlación entre las concentraciones de NO<sub>2</sub> en el sensor TROPOMI como variable dependiente y la de la caseta de monitoreo IPAC como variable independiente durante la semana de otoño del año 2021, en este caso la correlación fue de 0.51 (tabla 18) lo que representa una correlación moderada positiva en la escala de Milton y un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> de 0.26 es decir 26% de la variabilidad observada en los datos satelitales puede ser explicada por los datos de capturados en la superficie y el 74% restante se atribuye a otros factores no considerados en este modelo

La figura 35 muestra la correlación entre las concentraciones de NO<sub>2</sub> en el sensor TROPOMI como variable dependiente y la de la caseta de monitoreo Biblioteca como variable independiente durante la semana de otoño del año 2021, en este caso la correlación fue de 0.19 (tabla 19) lo que representa una correlación débil positiva en la escala de Milton y un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> de 0.036 (3.61%) esto sugiere que no existe una relación lineal significativa entre ambas mediciones y que la variabilidad de los datos satelitales se atribuyen a otros factores que no se incluyen en este análisis.

### 3.5 Correlación de Pearson entre NO<sub>2</sub> y las variables climáticas disponibles en las estaciones de monitoreo de calidad del aire de la SEGAM registrado a las 13 horas en la semana de invierno 2019.

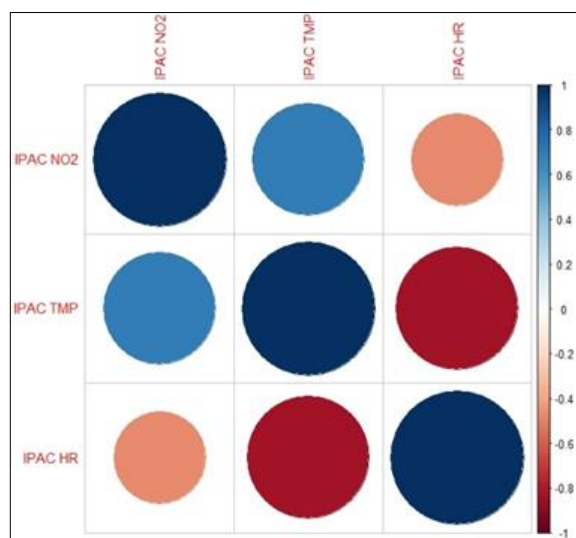


Figura 36. Correlación de Pearson de NO<sub>2</sub> y variables climáticas para la estación IPAC en la semana de invierno.

|                      | IPAC NO <sub>2</sub> | IPAC TMP | IPAC HR |
|----------------------|----------------------|----------|---------|
| IPAC NO <sub>2</sub> | 1.00                 | 0.69     | -0.47   |
| IPAC TMP             | 0.69                 | 1.00     | -0.83   |
| IPAC HR              | -0.47                | -0.83    | 1.00    |

Tabla 20. Matriz de correlación de Pearson de NO<sub>2</sub> y variables climáticas para la estación IPAC en la semana de invierno.

La figura 36 muestra la correlación entre la concentración de NO<sub>2</sub> de la caseta de monitoreo IPAC como variable dependiente y las diferentes variables climáticas con las que cuenta la caseta de monitoreo como variables independientes durante la semana de invierno del año 2019, en este caso (tabla 20) la correlación fue de 0.69 con respecto a la temperatura lo que representa una correlación moderada positiva y un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> de 0.47 es decir 47% y para la humedad relativa fue -0.47 lo que representa una correlación débil negativa en la escala de Milton con un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> de 0.22 es decir 22%.

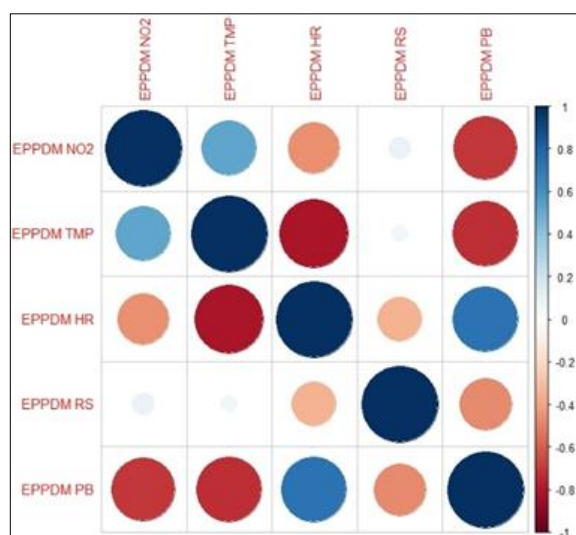


Figura 37. Correlación de Pearson de NO<sub>2</sub> y variables climáticas para la estación EPPDM en la semana de invierno.

|                       | EPPDM NO <sub>2</sub> | EPPDM TMP | EPPDM HR | EPPDM RS | EPPDM PB |
|-----------------------|-----------------------|-----------|----------|----------|----------|
| EPPDM NO <sub>2</sub> | 1.00                  | 0.52      | -0.45    | 0.08     | -0.70    |
| EPPDM TMP             | 0.52                  | 1.00      | -0.81    | 0.05     | -0.73    |
| EPPDM HR              | -0.45                 | -0.81     | 1.00     | -0.34    | 0.73     |
| EPPDM RS              | 0.08                  | 0.05      | -0.34    | 1.00     | -0.47    |
| EPPDM PB              | -0.70                 | -0.73     | 0.73     | -0.47    | 1.00     |

Tabla 21. Matriz de correlación de Pearson de NO<sub>2</sub> y variables climáticas para la estación EPPDM en la semana de invierno.

La figura 37 muestra la correlación entre la concentración de NO<sub>2</sub> de la caseta de monitoreo EPPDM como variable dependiente y las diferentes variables climáticas con las que cuenta la caseta de monitoreo como variables independientes durante la semana de invierno del año 2019, para este caso (tabla 21) la correlación fue de 0.52 con respecto a la temperatura (correlación moderada positiva) con un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> de 0.27 (27%), -0.45 para la humedad relativa (correlación débil negativa) con un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> de 0.20 (20%), 0.08 para la radiación solar (correlación débil positiva) con un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> de 0.006 (0.64%) y -0.70 para la presión barométrica (correlación moderada negativa) de acuerdo a la escala de Milton y un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> de 0.49 (49%).

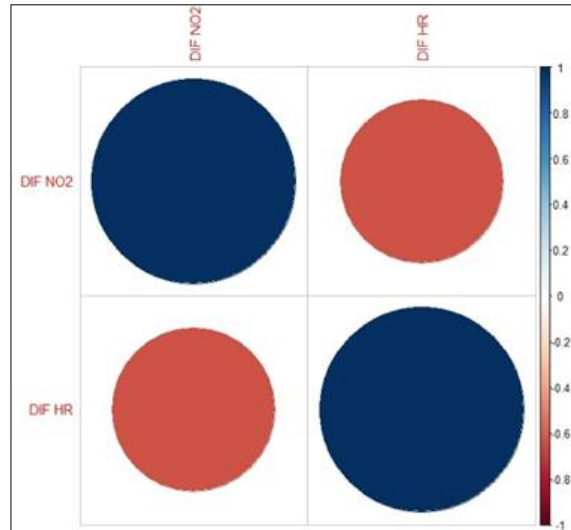


Figura 38. Correlación de Pearson de NO<sub>2</sub> y variables climáticas para la estación DIF en la semana de invierno.

|                     | DIF NO <sub>2</sub> | DIF HR |
|---------------------|---------------------|--------|
| DIF NO <sub>2</sub> | 1.00                | -0.63  |
| DIF HR              | -0.63               | 1.00   |

Tabla 22. Matriz de correlación de Pearson de NO<sub>2</sub> y variables climáticas para la estación DIF en la semana de invierno.

La figura 38 muestra la correlación entre la concentración de NO<sub>2</sub> de la caseta de monitoreo DIF como variable dependiente y la humedad relativa como variable independiente durante la semana de invierno del año 2019, para este caso (tabla 22) la correlación fue de -0.63 (correlación débil negativa) de acuerdo a la escala de Milton y un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> de 0.39 (39%).

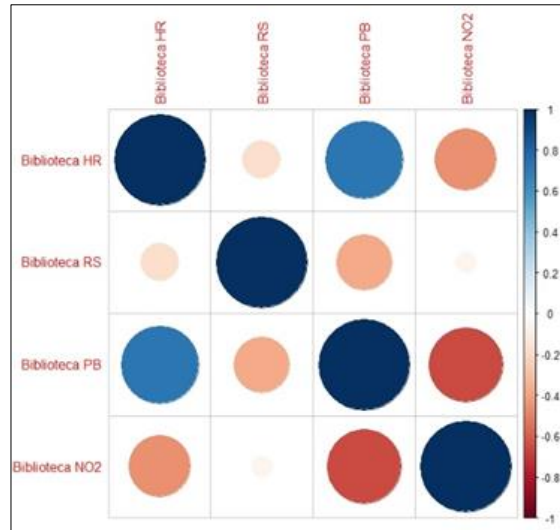


Figura 39. Correlación de Pearson de NO<sub>2</sub> y variables climáticas para la estación Biblioteca en la semana de invierno.

|                            | Biblioteca HR | Biblioteca RS | Biblioteca PB | Biblioteca NO <sub>2</sub> |
|----------------------------|---------------|---------------|---------------|----------------------------|
| Biblioteca HR              | 1.00          | -0.17         | 0.72          | -0.45                      |
| Biblioteca RS              | -0.17         | 1.00          | -0.37         | -0.05                      |
| Biblioteca PB              | 0.72          | -0.37         | 1.00          | -0.65                      |
| Biblioteca NO <sub>2</sub> | -0.45         | -0.05         | -0.65         | 1.00                       |

Tabla 23. Matriz de correlación de Pearson de NO<sub>2</sub> y variables climáticas para la estación Biblioteca en la semana de invierno.

La figura 39 muestra la correlación entre la concentración de NO<sub>2</sub> de la caseta de monitoreo Biblioteca como variable dependiente y las diferentes variables climáticas con las que cuenta la caseta de minotero como variables independientes durante la semana de invierno del año 2019, para este caso (tabla 23) la correlación fue de -0.45 con respecto a la humedad relativa (correlación débil negativa) con un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> de 0.20 (20%), -0.17 para la radiación solar (correlación débil negativa) con un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> de 0.028 (2.8%) y 0.72 para la presión barométrica (correlación moderada positiva) de acuerdo a la escala de Milton y un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> de 0.51 (51%).

### 3.6 Correlación de Pearson entre NO<sub>2</sub> y las variables climáticas disponibles en las estaciones de monitoreo de calidad del aire de la SEGAM registrado a las 13 horas en la semana de primavera 2020.

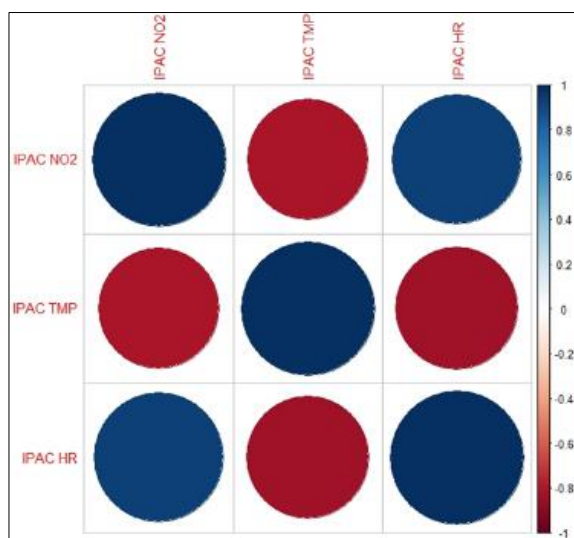


Figura 40. Correlación de Pearson de NO<sub>2</sub> y variables climáticas para la estación IPAC en la semana de primavera.

|                      | IPAC NO <sub>2</sub> | IPAC TMP | IPAC HR |
|----------------------|----------------------|----------|---------|
| IPAC NO <sub>2</sub> | 1.00                 | -0.81    | 0.93    |
| IPAC TMP             | -0.81                | 1.00     | -0.84   |
| IPAC HR              | 0.93                 | -0.84    | 1.00    |
|                      |                      |          |         |

Tabla 24. Matriz de correlación de Pearson de NO<sub>2</sub> y variables climáticas para la estación IPAC en la semana de primavera.

La figura 40 muestra la correlación entre la concentración de NO<sub>2</sub> de la caseta de monitoreo IPAC como variable dependiente y las diferentes variables climáticas con las que cuenta la caseta de monitoreo como variables independientes durante la semana de primavera del año 2020, para este caso (tabla 24) la correlación fue de -0.81 con respecto a la temperatura (correlación moderada negativa) con un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> de 0.65 (65%) y 0.93 para la humedad relativa (correlación fuerte positiva) de acuerdo a la escala de Milton y un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> de 0.86 (86%).

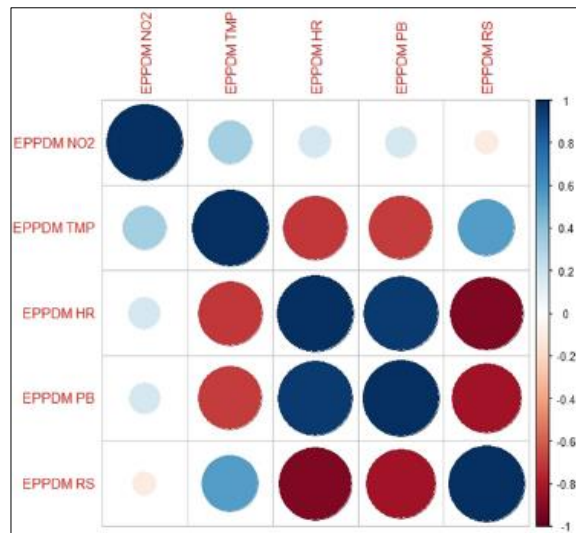


Figura 41. Correlación de Pearson de NO<sub>2</sub> y variables climáticas para la estación EPPDM en la semana de primavera.

|                       | EPPDM NO <sub>2</sub> | EPPDM TMP | EPPDM HR | EPPDM PB | EPPDM RS |
|-----------------------|-----------------------|-----------|----------|----------|----------|
| EPPDM NO <sub>2</sub> | 1.00                  | 0.33      | 0.17     | 0.17     | -0.10    |
| EPPDM TMP             | 0.33                  | 1.00      | -0.70    | -0.69    | 0.55     |
| EPPDM HR              | 0.17                  | -0.70     | 1.00     | 0.95     | -0.92    |
| EPPDM PB              | 0.17                  | -0.69     | 0.95     | 1.00     | -0.83    |
| EPPDM RS              | -0.10                 | 0.55      | -0.92    | -0.83    | 1.00     |

Tabla 25. Matriz de correlación de Pearson de NO<sub>2</sub> y variables climáticas para la estación EPPDM en la semana de primavera.

La figura 41 muestra la correlación entre la concentración de NO<sub>2</sub> de la caseta de monitoreo EPPDM como variable dependiente y las diferentes variables climáticas con las que cuenta la caseta de minotero como variables independientes durante la semana de primavera del año 2020, para este caso (tabla 25) la correlación fue de 0.33 con respecto a la temperatura (correlación débil positiva) con un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> de 0.10 (10%), 0.17 para la humedad relativa (correlación débil positiva) con un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> de 0.028 (2.8%), -0.10 para la radiación solar (correlación débil negativa) con un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> de 0.01 (1%), y 0.17 para la presión barométrica (correlación débil positiva) de acuerdo a la escala de Milton y un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> de 0.028 (2.8%).

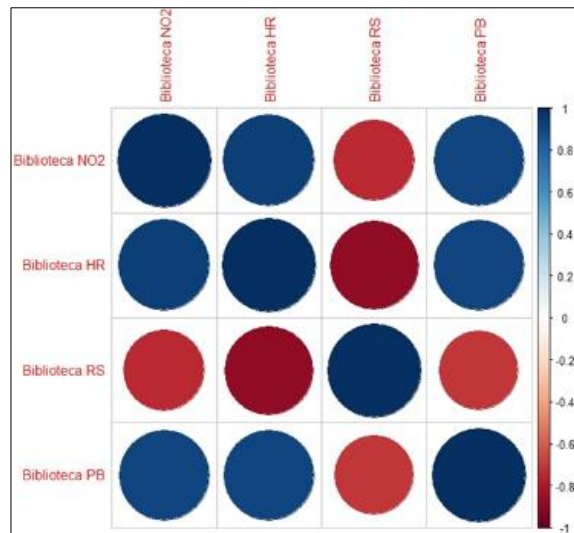


Figura 42. Correlación de Pearson de NO<sub>2</sub> y variables climáticas para la estación Biblioteca en la semana de primavera.

|                            | Biblioteca NO <sub>2</sub> | Biblioteca HR | Biblioteca RS | Biblioteca PB |
|----------------------------|----------------------------|---------------|---------------|---------------|
| Biblioteca NO <sub>2</sub> | 1.00                       | 0.93          | -0.74         | 0.91          |
| Biblioteca HR              | 0.93                       | 1.00          | -0.88         | 0.91          |
| Biblioteca RS              | -0.74                      | -0.88         | 1.00          | -0.70         |
| Biblioteca PB              | 0.91                       | -0.91         | -0.70         | 1.00          |

Tabla 26. Matriz de correlación de Pearson de NO<sub>2</sub> y variables climáticas para la estación Biblioteca en la semana de primavera.

La figura 42 muestra la correlación entre la concentración de NO<sub>2</sub> de la caseta de monitoreo Biblioteca como variable dependiente y las diferentes variables climáticas con las que cuenta la caseta de minotero como variables independientes durante la semana de primavera del año 2020, para este caso (tabla 26) la correlación fue de 0.93 con respecto a la humedad relativa (correlación fuerte positiva) con un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> de 0.86 (86%), -0.74 para la radiación solar (correlación moderada negativa) con un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> de 0.54 (54%) y 0.91 para la presión barométrica (correlación fuerte positiva) de acuerdo a la escala de Milton y un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> de 0.82 (82%).

### 3.7 Correlación de Pearson entre NO<sub>2</sub> y las variables climáticas disponibles en las estaciones de monitoreo de calidad del aire de la SEGAM registrado a las 13 horas en la semana de verano 2020.

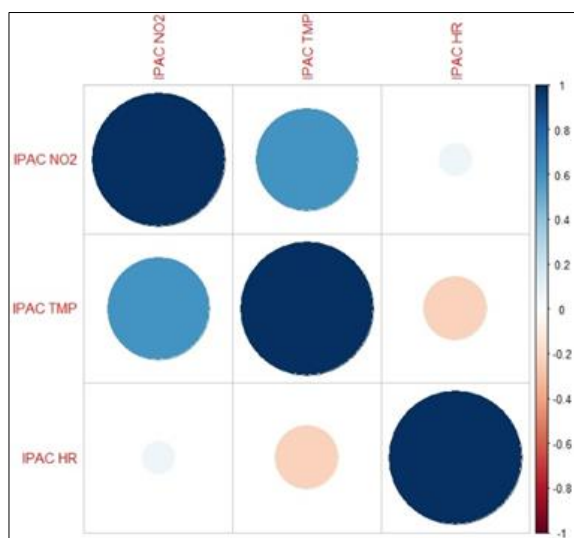


Figura 43. Correlación de Pearson de NO<sub>2</sub> y variables climáticas para la estación IPAC en la semana de verano.

|                      | IPAC NO <sub>2</sub> | IPAC TMP | IPAC HR |
|----------------------|----------------------|----------|---------|
| IPAC NO <sub>2</sub> | 1.00                 | 0.59     | 0.06    |
| IPAC TMP             | 0.59                 | 1.00     | -0.22   |
| IPAC HR              | 0.06                 | -0.22    | 1.00    |

Tabla 27. Matriz de correlación de Pearson de NO<sub>2</sub> y variables climáticas para la estación IPAC en la semana de verano

La figura 43 muestra la correlación entre la concentración de NO<sub>2</sub> de la caseta de monitoreo IPAC como variable dependiente y las diferentes variables climáticas con las que cuenta la caseta de minotero como variables independientes durante la semana de verano del año 2020, en este caso (tabla 27) la correlación fue de 0.59 con respecto a la temperatura lo que representa una correlación moderada positiva con un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> de 0.34 (34%) y para la humedad relativa fue 0.06 lo que representa una correlación débil positiva en la escala de Milton y un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> de 0.003 (0.3%).

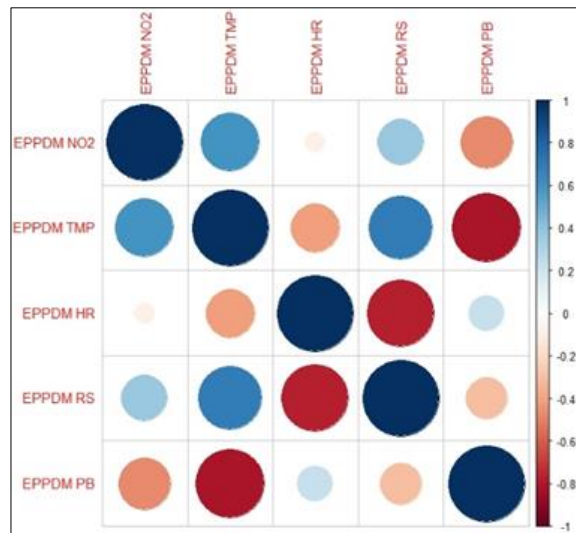


Figura 44. Correlación de Pearson de NO<sub>2</sub> y variables climáticas para la estación EPPDM en la semana de verano.

|                       | EPPDM NO <sub>2</sub> | EPPDM TMP | EPPDM HR | EPPDM RS | EPPDM PB |
|-----------------------|-----------------------|-----------|----------|----------|----------|
| EPPDM NO <sub>2</sub> | 1.00                  | 0.59      | -0.07    | 0.37     | -0.47    |
| EPPDM TMP             | 0.59                  | 1.00      | -0.41    | 0.69     | -0.81    |
| EPPDM HR              | -0.07                 | -0.41     | 1.00     | -0.77    | 0.22     |
| EPPDM RS              | 0.37                  | 0.69      | -0.77    | 1.00     | -0.30    |
| EPPDM PB              | -0.47                 | -0.81     | 0.22     | -0.30    | 1.00     |

Tabla 28. Matriz de correlación de Pearson de NO<sub>2</sub> y variables climáticas para la estación EPPDM en la semana de verano.

La figura 44 muestra la correlación entre la concentración de NO<sub>2</sub> de la caseta de monitoreo EPPDM como variable dependiente y las diferentes variables climáticas con las que cuenta la caseta de minotero como variables independientes durante la semana de verano del año 2020, para este caso (tabla 28) la correlación fue de 0.59 con respecto a la temperatura (correlación moderada positiva) con un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> de 0.34 (34%), -0.07 para la humedad relativa (correlación débil negativa) con un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> de 0.004 (0.4%), 0.37 para la radiación solar (correlación débil positiva) con un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> de 0.13 (13%) y -0.47 para la presión barométrica (correlación moderada negativa) de acuerdo a la escala de Milton y un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> de 0.22 (22%).

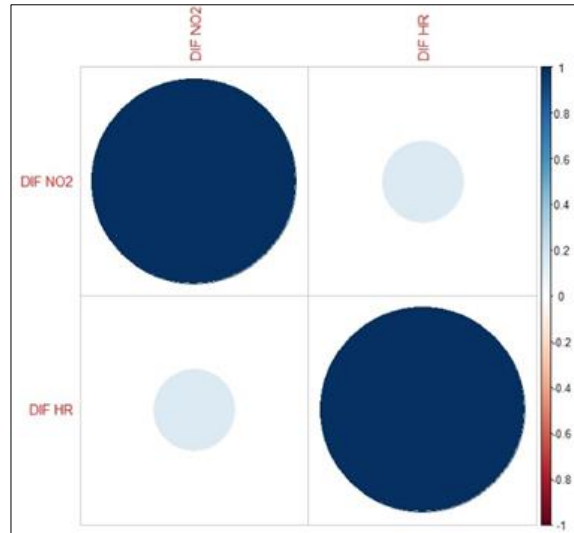


Figura 45. Correlación de Pearson de NO<sub>2</sub> y variables climáticas para la estación DIF en la semana de verano.

|                     | DIF NO <sub>2</sub> | DIF HR |
|---------------------|---------------------|--------|
| DIF NO <sub>2</sub> | 1.00                | 0.15   |
| DIF HR              | 0.15                | 1.00   |

Tabla 29. Matriz de correlación de Pearson de NO<sub>2</sub> y variables climáticas para la estación DIF en la semana de verano.

La figura 45 muestra la correlación entre la concentración de NO<sub>2</sub> de la caseta de monitoreo DIF como variable dependiente y la humedad relativa como variable independiente durante la semana de verano del año 2020, para este caso (tabla 29) la correlación fue de 0.15 (correlación débil positiva) de acuerdo a la escala de Milton y un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> de 0.022 (2.25%).

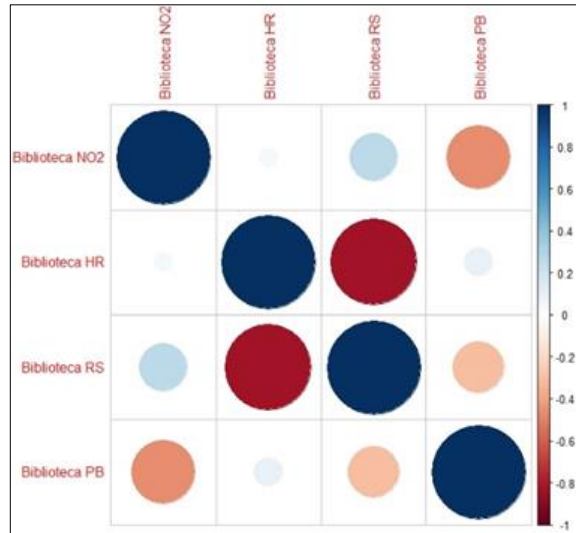


Figura 46. Correlación de Pearson de NO<sub>2</sub> y variables climáticas para la estación Biblioteca en la semana de verano.

|                            | Biblioteca NO <sub>2</sub> | Biblioteca HR | Biblioteca RS | Biblioteca PB |
|----------------------------|----------------------------|---------------|---------------|---------------|
| Biblioteca NO <sub>2</sub> | 1.00                       | 0.04          | 0.26          | -0.46         |
| Biblioteca HR              | 0.04                       | 1.00          | -0.83         | 0.09          |
| Biblioteca RS              | 0.26                       | -0.83         | 1.00          | -0.30         |
| Biblioteca PB              | -0.46                      | 0.09          | -0.30         | 1.00          |

Tabla 30. Matriz de correlación de Pearson de NO<sub>2</sub> y variables climáticas para la estación Biblioteca en la semana de verano.

La figura 46 muestra la correlación entre la concentración de NO<sub>2</sub> de la caseta de monitoreo Biblioteca como variable dependiente y las diferentes variables climáticas con las que cuenta la caseta de minotero como variables independientes durante la semana de verano del año 2020, para este caso (tabla 30) la correlación fue de -0.04 con respecto a la humedad relativa (correlación débil positiva) con un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> de 0.001 (0.1%), 0.26 para la radiación solar (correlación débil positiva) con un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> de 0.067 (6%) y -0.46 para la presión barométrica (correlación moderada negativa) de acuerdo a la escala de Milton y un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> de 0.21 (21%).

### 3.8 Correlación de Pearson entre NO<sub>2</sub> y las variables climáticas disponibles en las estaciones de monitoreo de calidad del aire de la SEGAM registrado a las 13 horas en la semana de otoño 2021.

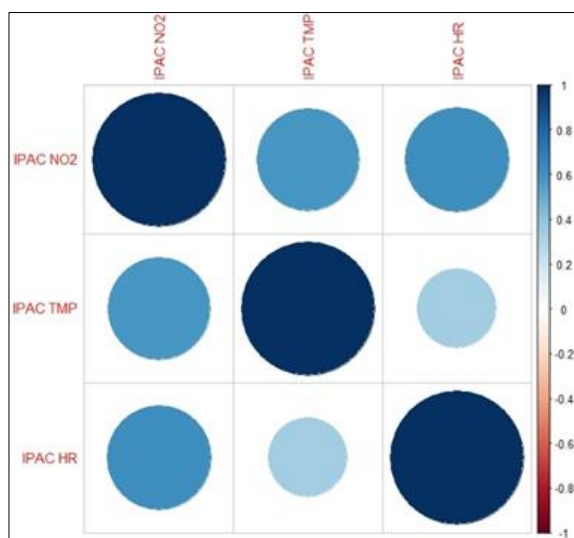


Figura 47. Correlación de Pearson de NO<sub>2</sub> y variables climáticas para la estación IPAC en la semana de otoño.

|                      | IPAC NO <sub>2</sub> | IPAC TMP | IPAC HR |
|----------------------|----------------------|----------|---------|
| IPAC NO <sub>2</sub> | 1.00                 | 0.58     | 0.61    |
| IPAC TMP             | 0.58                 | 1.00     | 0.34    |
| IPAC HR              | 0.61                 | 0.34     | 1.00    |

Tabla 31. Matriz de correlación de Pearson de NO<sub>2</sub> y variables climáticas para la estación IPAC en la semana de otoño.

La figura 47 muestra la correlación entre la concentración de NO<sub>2</sub> de la caseta de monitoreo IPAC como variable dependiente y las diferentes variables climáticas con las que cuenta la caseta de monitoreo como variables independientes durante la semana de otoño del año 2021, en este caso (tabla 31) la correlación fue de 0.58 con respecto a la temperatura con un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> de 0.33 (33%) y para la humedad relativa fue 0.61 lo que representa una correlación moderada positiva para ambas variables en la escala de Milton y un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> de 0.37 (37%).

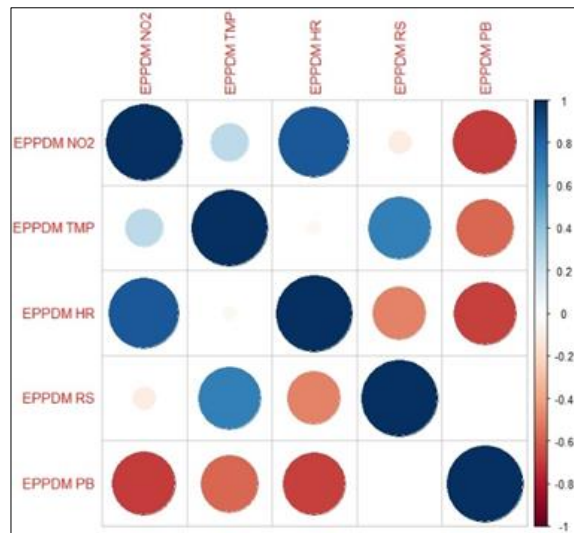


Figura 48. Correlación de Pearson de NO<sub>2</sub> y variables climáticas para la estación EPPDM en la semana de otoño.

|                       | EPPDM NO <sub>2</sub> | EPPDM TMP | EPPDM HR | EPPDM RS | EPPDM PB |
|-----------------------|-----------------------|-----------|----------|----------|----------|
| EPPDM NO <sub>2</sub> | 1.00                  | 0.26      | 0.84     | -0.09    | -0.69    |
| EPPDM TMP             | 0.26                  | 1.00      | -0.03    | 0.68     | -0.57    |
| EPPDM HR              | 0.84                  | -0.03     | 1.00     | -0.49    | -0.68    |
| EPPDM RS              | -0.09                 | 0.68      | -0.49    | 1.00     | 0.00     |
| EPPDM PB              | -0.69                 | -0.57     | -0.68    | 0.00     | 1.00     |

Tabla 32. Matriz de correlación de Pearson de NO<sub>2</sub> y variables climáticas para la estación EPPDM en la semana de otoño.

La figura 48 muestra la correlación entre la concentración de NO<sub>2</sub> de la caseta de monitoreo EPPDM como variable dependiente y las diferentes variables climáticas con las que cuenta la caseta de minotero como variables independientes durante la semana de otoño del año 2021, para este caso (tabla 32) la correlación fue de 0.26 con respecto a la temperatura (correlación débil positiva) con un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> de 0.067 (6%), 0.84 para la humedad relativa (correlación moderada positiva) con un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> de 0.70 (70%), -0.09 para la radiación solar (correlación débil negativa) con un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> de 0.008 (0.8%) y -0.69 para la presión barométrica (correlación moderada negativa) de acuerdo a la escala de Milton y un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> de 0.47 (47%).

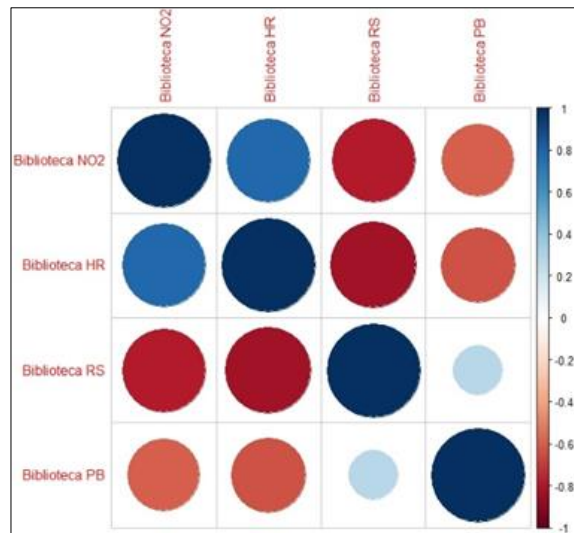


Figura 49. Correlación de Pearson de NO<sub>2</sub> y variables climáticas para la estación Biblioteca en la semana de otoño.

|                            | Biblioteca NO <sub>2</sub> | Biblioteca HR | Biblioteca RS | Biblioteca PB |
|----------------------------|----------------------------|---------------|---------------|---------------|
| Biblioteca NO <sub>2</sub> | 1.00                       | 0.78          | -0.78         | -0.59         |
| Biblioteca HR              | 0.78                       | 1.00          | -0.83         | -0.63         |
| Biblioteca RS              | -0.78                      | -0.83         | 1.00          | 0.27          |
| Biblioteca PB              | -0.59                      | -0.63         | 0.27          | 1.00          |

Tabla 33. Matriz de correlación de Pearson de NO<sub>2</sub> y variables climáticas para la estación Biblioteca en la semana de otoño.

La figura 49 muestra la correlación entre la concentración de NO<sub>2</sub> de la caseta de monitoreo Biblioteca como variable dependiente y las diferentes variables climáticas con las que cuenta la caseta de minotero como variables independientes durante la semana de otoño del año 2021, para este caso (tabla 33) la correlación fue de 0.78 con respecto a la humedad relativa (correlación moderada positiva) con un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> de 0.60 o (60%), -0.78 para la radiación solar (correlación moderada negativa) con un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> de 0.60 (60%) y -0.59 para la presión barométrica (correlación moderada negativa) de acuerdo a la escala de Milton y un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> de 0.34 (34%).

A continuación, se muestran de manera simplificada la interpretación de las correlaciones obtenidas previamente.

| Semana    | Estación   | Correlación NO <sub>2</sub> SEGAM - NO <sub>2</sub> Sentinel 5P |
|-----------|------------|---|
| Invierno  | IPAC       | Moderado +  |
|           | EPPDM      | Débil -   |
|           | DIF        | Moderado +  |
|           | Biblioteca | Débil +   |
| Primavera | IPAC       | Débil +   |
|           | EPPDM      | Débil -   |
|           | DIF        | Moderado +  |
|           | Biblioteca | Débil -   |
| Verano    | IPAC       | Moderado +  |
|           | EPPDM      | Moderado +  |
|           | DIF        | Moderado +  |
|           | Biblioteca | Débil +   |
| Otoño     | IPAC       | Moderado +  |
|           | EPPDM      | Débil +   |
|           | DIF        | Moderado +  |
|           | Biblioteca | Débil +   |

Tabla 34. Interpretación de correlación de NO<sub>2</sub> del sensor Sentinel-5P y NO<sub>2</sub> de las estaciones de monitoreo de calidad del aire de la SEGAM.

| Semana    | Estación   | NO <sub>2</sub> - Temperatura | NO <sub>2</sub> - Humedad relativa | NO <sub>2</sub> - Radiación solar | NO <sub>2</sub> - Presión barométrica |
|-----------|------------|-------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| Invierno  | IPAC       | Moderado +                    | Débil -                            | Sin dato                          | Sin dato                              |
|           | EPPDM      | Moderado +                    | Débil -                            | Débil +                           | Moderado -                            |
|           | DIF        | Sin dato                      | Moderado -                         | Sin dato                          | Sin dato                              |
|           | Biblioteca | Sin dato                      | Débil -                            | Débil -                           | Moderado -                            |
| Primavera | IPAC       | Moderado -                    | Fuerte +                           | Sin dato                          | Sin dato                              |
|           | EPPDM      | Débil +                       | Débil +                            | Débil -                           | Débil +                               |
|           | DIF        | Sin dato                      | Sin dato                           | Sin dato                          | Sin dato                              |
|           | Biblioteca | Sin dato                      | Fuerte +                           | Moderado -                        | Fuerte +                              |
| Verano    | IPAC       | Moderado +                    | Débil +                            | Sin dato                          | Sin dato                              |
|           | EPPDM      | Moderado +                    | Débil -                            | Débil +                           | Débil -                               |
|           | DIF        | Sin dato                      | Débil +                            | Sin dato                          | Sin dato                              |
|           | Biblioteca | Sin dato                      | Débil +                            | Débil +                           | Débil -                               |
| Otoño     | IPAC       | Moderado +                    | Moderado +                         | Sin dato                          | Sin dato                              |
|           | EPPDM      | Débil +                       | Moderado +                         | Débil -                           | Moderado -                            |
|           | DIF        | Sin dato                      | Sin dato                           | Sin dato                          | Sin dato                              |
|           | Biblioteca | Sin dato                      | Moderado +                         | Moderado -                        | Moderado -                            |

Tabla 35. Interpretación de correlación de Pearson entre NO<sub>2</sub> y las variables climáticas disponibles en las estaciones de monitoreo de calidad del aire de la SEGAM.

Los resultados de las correlaciones de Pearson entre los datos del sensor satelital y los datos capturados en las casetas de monitoreo (tabla 34) en las cuatro semanas que se analizaron en su mayoría arrojaron correlaciones positivas la mitad de ellas moderadas positivas y solo 3 correlaciones negativas, destacan entre ellas la estación DIF con correlaciones moderadas positivas en las 4 semanas y la estación IPAC con correlación moderada positiva durante 3 semanas y débil positiva en la semana de primavera, la estación de la Biblioteca presenta correlación débil negativa durante la semana de primavera y débil positiva durante la semana de invierno, verano y otoño, finalmente la estación EPPDM muestra durante la semana de invierno y primavera correlación débil negativa, en la semana de verano moderado positiva y para la semana de otoño débil positiva.

En el caso del análisis realizado entre  $\text{NO}_2$  y las variables climáticas de las estaciones de monitoreo presentan correlaciones moderadas positivas con las variables de temperatura durante las semanas de invierno, verano y otoño y humedad relativa destacando en la semana de otoño, la presión barométrica muestra una correlación moderada negativa con el  $\text{NO}_2$  durante las semanas de invierno y otoño en la estación EPPDM y Biblioteca, sin embargo como se puede apreciar en la tabla 35, en las cuatro columnas donde se correlaciono el  $\text{NO}_2$  con las variables climáticas tenemos campos con la leyenda *Sin dato* lo que presenta la falta de continuidad de datos disponibles, pese a que se eligieron esas cuatro semanas por ser los que tenían mayor cantidad de datos disponibles en el periodo analizado.

#### **4. CAPÍTULO 3. ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE DIÓXIDO DE NITRÓGENO DEL SENSOR REMOTO SENTINEL-5P EN EL VSLP.**

##### **4.1 Análisis geoestadístico y modelos de interpolación espacial.**

Durante las últimas décadas los Sistemas de Información Geográfica han abierto una nueva visión y operabilidad práctica en el apoyo de toma de decisiones principalmente en el campo de la geoestadística y las superficies de estimación a partir de datos puntuales, el uso de las tecnologías emergentes en el análisis de la información es cada vez más notoria y tiene repercusiones en un sin número de áreas de ingeniería e investigación (Londoño, 2010). Estudiar un fenómeno espacial y espacio - temporal requiere de la búsqueda de herramientas estadísticas que permitan analizar la dependencia de espacio, tiempo e interacciones. La geoestadística es la ciencia que aborda este tipo de temas y su finalidad es predecir fenómenos espaciales (Alvarado, 2011). Para ello existen diferentes modelos de interpolación espacial.

La interpolación es un proceso que predice valores para las celdas de un ráster a partir de un número limitado de puntos de datos de muestra. Este proceso se emplea para estimar valores desconocidos de cualquier tipo de dato asociado a un punto geográfico, como la elevación, las precipitaciones, las concentraciones químicas, los niveles de ruido, entre otros (ESRI, 2016).

- IDW (Inverse Distance Weighting): Este método de interpolación estima los valores de las celdas calculando los promedios de los valores de cada punto, considerando la proximidad de cada celda a los puntos vecinos. A medida que un punto se encuentra más cerca del centro de la celda que se está estimando, tiene mayor peso en el cálculo del promedio, es útil cuando los puntos de muestreo son relativamente densos y homogéneos además de que no requiere un análisis estadístico previo, sin embargo, es un método determinista (no estima el error).

- Kriging: Es un método geoestadístico avanzado que genera una superficie de valores a partir de puntos dispersos con valores z. Antes de seleccionar el mejor método de estimación para generar la superficie, es necesario realizar un análisis del comportamiento espacial del fenómeno representado por los valores z, tiene la ventaja de que considera la correlación espacial entre los datos (variograma) y permite calcular el error de predicción, es importante señalar que requiere un número suficiente de datos para ajustar un semivariograma confiable.
- Vecino natural: Este enfoque se basa en identificar el subconjunto de muestras más cercanas a un punto de consulta y asigna ponderaciones a estas muestras, utilizando áreas proporcionales para realizar la interpolación.
- Spline: En este método de interpolación, los valores se estiman mediante una función matemática que minimiza la curvatura general de la superficie, produciendo una superficie suave que pasa exactamente por los puntos de entrada.
- Topo a ráster: Utiliza una técnica específica de interpolación diseñada para crear una superficie que represente de forma más precisa un terreno de drenaje natural, conservando adecuadamente las cadenas montañosas y redes de arroyos presentes en los datos de curvas de nivel de entrada.
- Tendencia: Este tipo de interpolación polinómica global ajusta una superficie de acuerdo con una función matemática que toma en cuenta los puntos de muestra de entrada. La superficie generada cambia de manera gradual y captura patrones a gran escala sin detallar las variaciones locales de los datos.

#### **4.2 Insumos y análisis exploratorio de los datos.**

El análisis exploratorio de los datos constituye un paso imprescindible para la aplicación de la geoestadística, pretende verificar el nivel de normalidad de los datos, la incidencia de los valores extremos sobre las estadísticas de los datos, así como la presencia de tendencias polinómicas en el conjunto de datos (Giraldo, 2012). Para el análisis exploratorio de los datos de NO<sub>2</sub> provenientes del Sensor Sentinel - 5P, se examina la distribución y la estadística de los datos a través del Histograma, se evalúa

si un conjunto de datos está distribuido normalmente y examina si dos conjuntos de datos tienen distribuciones similares respectivamente con el Gráfico Normal QQPlot, por último, se realiza un Análisis de Tendencia para visualizar las tendencias espaciales de los datos, esto consiste en un gráfico en tres dimensiones de los datos de la variable que se está estudiando.

En este estudio se analizaron cuatro fechas cada una corresponde a las semanas analizadas anteriormente, así como seis fechas más en las que se observó una mayor concentración de NO<sub>2</sub> en el área de interés, con el objetivo de hacer una comparación que nos permita entender el comportamiento del NO<sub>2</sub> dentro del VSLP.

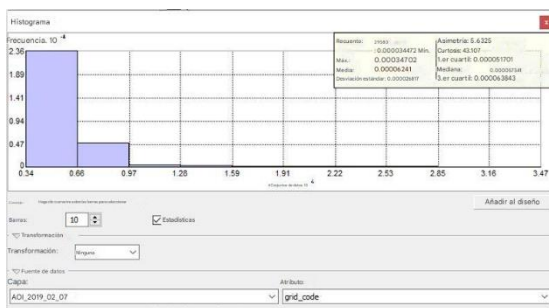


Figura 50. Histograma de la variable NO<sub>2</sub> del Sensor Sentinel - 5P correspondiente al 7 de febrero de 2019, sin ninguna transformación.



Figura 51. Histograma de la variable NO<sub>2</sub> del Sensor Sentinel - 5P correspondiente al 7 de febrero de 2019, con transformación logarítmica.

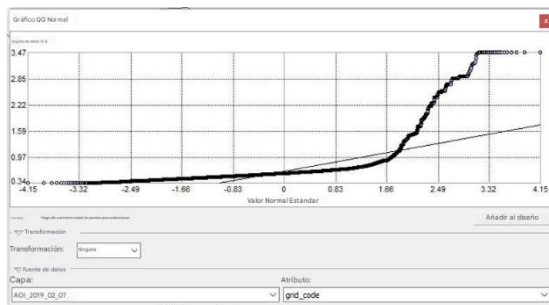


Figura 52. Normal QQPlot de la variable NO<sub>2</sub> del Sensor Sentinel - 5P correspondiente al 7 de febrero de 2019, sin ninguna transformación.

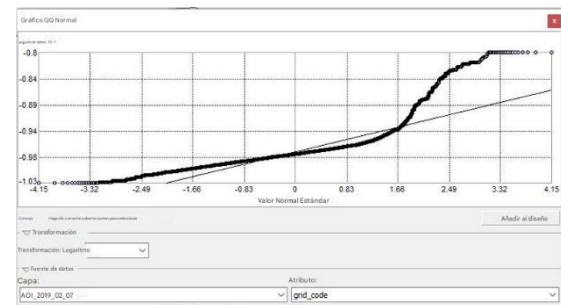


Figura 53. Normal QQPlot de la variable NO<sub>2</sub> del Sensor Sentinel - 5P correspondiente al 7 de febrero de 2019, con transformación logarítmica.

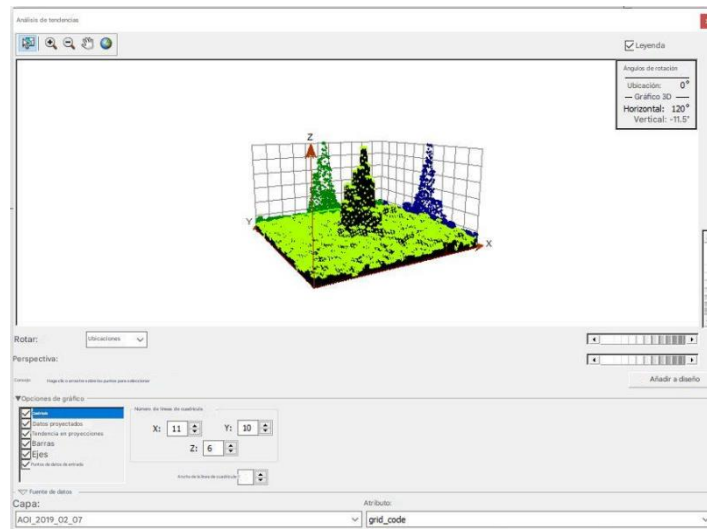


Figura 54. Trend Analysis de la variable  $\text{NO}_2$  del Sensor Sentinel - 5P correspondiente al 7 de febrero de 2019.

En la figura 50 se muestra el histograma correspondiente al 7 de febrero de 2019 y se observa una distribución sesgada hacia la izquierda, lo que representa que la distribución de los puntos no es uniforme. El valor de Kurtosis está muy por encima del valor estándar de 3 (valor de homogeneidad definido por ArcMap) teniendo un valor de 43.1, por lo que se realizó una transformación logarítmica y se puede observar en la figura 51 el histograma simétrico con valores más homogéneos, la Kurtosis se mejoró con un valor de 14.7 y la media y la mediana tienen valores muy parecidos lo que indica que la distribución es normal. La figura 52 nos muestra el Normal QQPlot con una distribución atípica en los puntos ya que no es cercana a la línea de tendencia lo que muestra que el comportamiento no es normal y la figura 53 presenta una transformación logarítmica y se observan los puntos más cerca de la línea de tendencia, lo que indica una distribución normal. Finalmente se realizó el análisis de tendencia, este es un gráfico en tres dimensiones que es útil para identificar si los datos puntuales tienen algún patrón o tendencia en función de la ubicación geográfica, la figura 54 muestra tanto para la proyección del plano XZ (línea verde) que indica la tendencia que tienen los datos de oeste a este, como la YZ (línea azul) la cual indica la tendencia de norte a sur, el valor de la concentración se proyecta en el eje Z, esto nos indica que la concentración de  $\text{NO}_2$  se encuentra en la parte central de la zona de estudio, donde se ubica la zona conurbada de San Luis Potosí, ya que tanto la línea verde como la azul tienden a subir en el centro y bajar en los extremos.

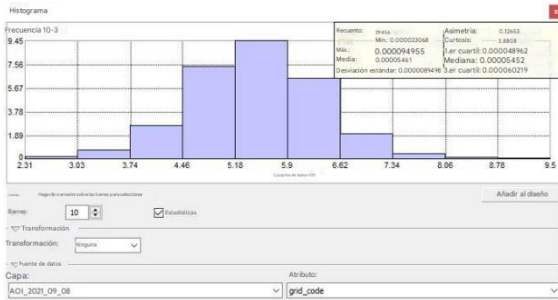


Figura 55. Histograma de la variable NO<sub>2</sub> del Sensor Sentinel - 5P correspondiente al 8 de septiembre de 2021, sin ninguna transformación.



Figura 56. Histograma de la variable NO<sub>2</sub> del Sensor Sentinel - 5P correspondiente al 8 de septiembre de 2021, con transformación logarítmica.

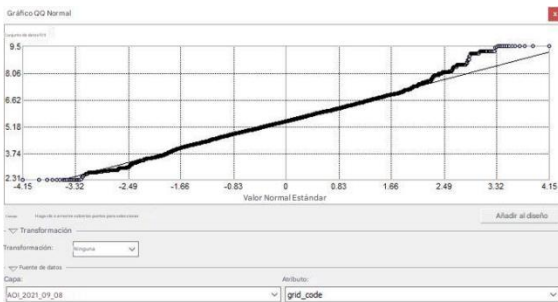


Figura 57. Normal Q-QPlot de la variable NO<sub>2</sub> del Sensor Sentinel - 5P correspondiente al 8 de septiembre de 2021, sin ninguna transformación.

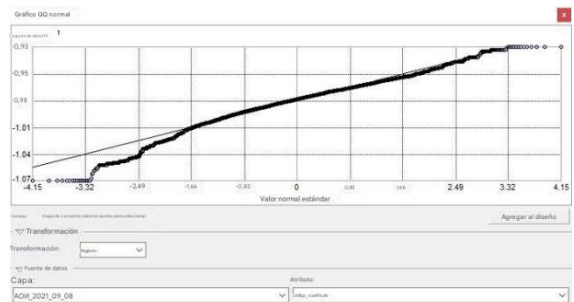


Figura 58. Normal Q-QPlot de la variable NO<sub>2</sub> del Sensor Sentinel - 5P correspondiente al 8 de septiembre de 2021, con transformación logarítmica.

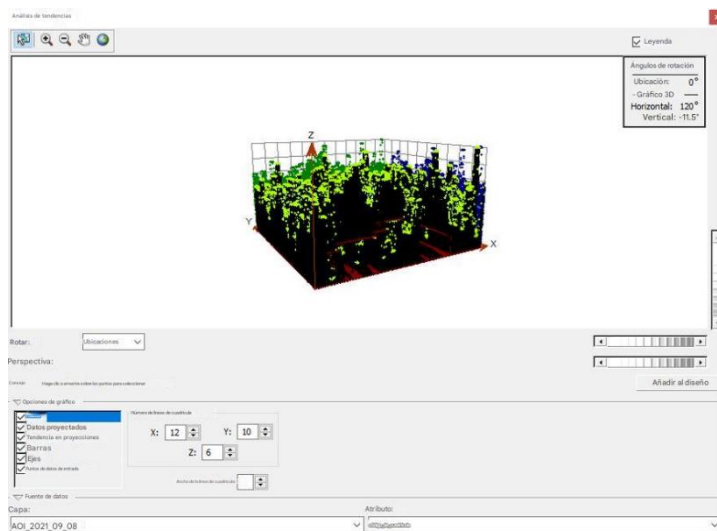


Figura 59. Trend Analysis de la variable NO<sub>2</sub> del Sensor Sentinel - 5P correspondiente al 8 de septiembre de 2021.

La figura 55 muestra el histograma correspondiente al 8 de septiembre de 2021 y se observa una distribución normal. El valor de Kurtosis está muy cerca del valor estándar teniendo un valor de 3.8, del mismo modo se aprecia que los valores de la media y la mediana son muy similares, se realizó una transformación logarítmica (figura 56) para ver si se podían mejorar aún más los resultados y el histograma con transformación logarítmica no mejoraba los resultados si no lo contrario, principalmente se puede apreciar en la figura que el histograma está un poco sesgado hacia la derecha y la media y la mediana aunque tienen valores parecidos existe más diferencia que en el anterior. La figura 57 nos muestra el Normal QQPlot con una distribución normal muy cercana a la línea de tendencia lo que muestra que el comportamiento es normal y la figura 58 presenta una transformación logarítmica y se observan los puntos un poco alejados de la línea de tendencia en la parte inferior, aunque en la superior si se aproximaron un poco más a la línea de tendencia. Finalmente se realizó el análisis de tendencia, para identificar si los datos puntuales tienen algún patrón o tendencia en función de la ubicación geográfica, la figura 59 muestra tanto para la proyección del plano XZ, como la YZ que la concentración de NO<sub>2</sub> se encuentra de manera similar en la mayor parte de la zona de estudio, ya que ambas líneas de tendencia se comportan de manera casi horizontal y como se puede apreciar los valores de concentración en el eje Z tienen un comportamiento semejante lo que nos indica que son valores muy parecidos.

### **4.3 Aplicación de método geoestadístico Kriging.**

El método de interpolación Kriging asociado a geoestadística ha sido propuesto como el mejor método de interpolación, cuando se utiliza de la manera correcta, realizando los pasos necesarios durante el análisis y modelado geoestadístico (Garnier, 2022). Una vez realizado el análisis exploratorio de los datos se evalúa la dependencia espacial del conjunto de datos con el modelo de semi-variograma / covarianza y por último se procede a elegir el método de interpolación más adecuado para cada fecha tomando en cuenta los errores de predicción y la función de regresión entre el Kriging Simple y el Ordinario. Este proceso es realizado con la herramienta *Geoestatistical*

Wizard la cual establece una serie de pasos para obtener una extensión de valores a través de distintos métodos de interpolación. Principalmente se indica el método geoestadístico Kriging o Co-Kriging y se identifica el campo de la base de datos espacial para realizar la interpolación, posteriormente se realiza una comparación de resultados para comprobar cual es el método que tiene un mejor comportamiento en este caso se realizó el análisis con el Kriging Simple y el Kriging Ordinario.

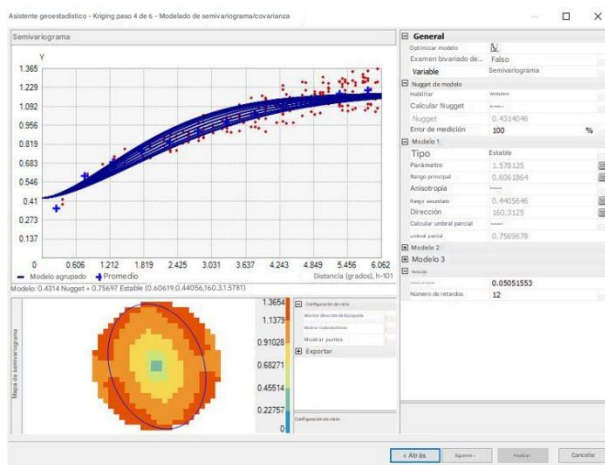


Figura 60. Modelo semi-variograma gaussiano de la variable NO<sub>2</sub> del Sensor Sentinel - 5P correspondiente al 7 de febrero de 2019.

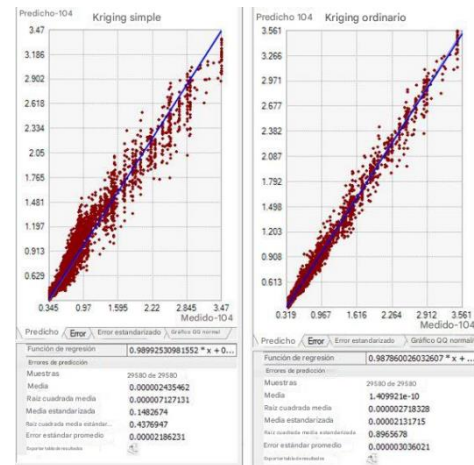


Figura 61. Comparación entre Kriging Simple y Kriging Ordinario de NO<sub>2</sub> del Sensor Sentinel - 5P correspondiente al 7 de febrero de 2019.

En la figura 60 se observa el comportamiento del semi-variograma derivado de la nube de puntos que fue ajustado a un tipo de modelo Gaussiano para el 7 de febrero de 2019, en estos datos existe anisotropía, es decir que se observa una variación de valores en cualquier dirección. Por otra parte, la figura 61 muestra la comparación de resultados entre los valores de la media estandarizada y la raíz cuadrada media estándar entre el Kriging Simple y el Kriging Ordinario, en esta fecha los mejores resultados se obtuvieron con el Kriging Ordinario ya que la media estandarizada es más cercana a cero lo que nos dice que es menos disperso y la raíz cuadrada media estándar tiene el valor más cercano a 1 obteniendo con este método 0.89.

El análisis realizado para el 8 de septiembre de 2021 dio resultados similares en cuanto al semi-variograma, en la figura 62 se observa anisotropía en los valores de la nube de puntos, así mismo la figura 63 muestra la comparación entre los resultados obtenidos entre el Kriging Simple y el Kriging Ordinario, el Kriging Simple tiene un valor más aproximado a cero en la media estandarizada, en cuanto a la raíz cuadrada media estándar el Kriging Simple dio 0.62 y el Kriging Ordinario 0.77 que en este caso se aproxima más a 1, por lo que se comparó en este caso el coeficiente de determinación

( $R^2$ ) donde el Kriging Simple dio como resultado 0.96 y el Kriging Ordinario 0.97, por lo que el Kriging Ordinario tiene un ajuste ligeramente superior, y lo que es más importante, una caracterización de la incertidumbre en la raíz cuadrada media estándar más confiable y precisa.

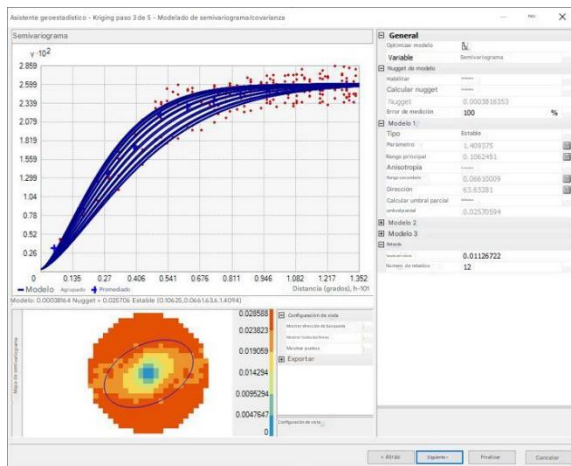


Figura 62. Modelo semi-variograma gaussiano de la variable  $\text{NO}_2$  del Sensor Sentinel - 5P correspondiente al 8 de septiembre de 2021.

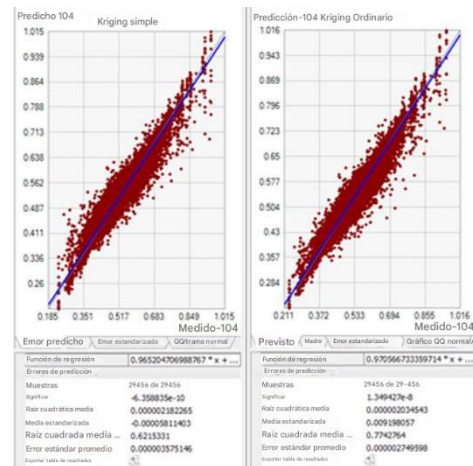


Figura 63. Comparación entre Kriging Simple y Kriging Ordinario de  $\text{NO}_2$  del Sensor Sentinel - 5P correspondiente al 8 de septiembre de 2021.

#### 4.4 Resultados

Se realizó el análisis exploratorio de los datos para cada una de las fechas en el caso de las fechas analizadas dentro del periodo analizado tanto para la cuenca atmosférica como para las correlaciones de Pearson, el histograma y el Normal QQPlot mostraron mejores resultados con la transformación logarítmica para el 3 de diciembre de 2019 (semana de invierno) y el 25 de mayo de 2020 (semana de primavera) y un patrón en la parte central en el análisis de tendencia, lo que representa valores más elevados de  $\text{NO}_2$  en la parte central del área de estudio, sin embargo durante el 7 de julio de 2020 (semana de verano) y el 8 de septiembre (semana de otoño) ambas interpolaciones muestran concentraciones bajas de  $\text{NO}_2$  en toda el área de estudio, el Kriging Simple mostro mejores resultados en los valores de media estandarizada, raíz cuadrada media estándar y el coeficiente de determinación durante la semana de invierno, primavera y verano y el Kriging Ordinario dio mejores resultados en sus predicciones durante la semana de otoño.

Las figuras 64, 65, 66 y 67 muestran los mapas resultantes de las interpolaciones correspondientes, en la figura 64 se pudo apreciar una mayor concentración en la parte central del VSLP con los valores más altos en la zona norte de la zona

conurbada, la figura 65 muestra valores más bajos con la mayor concentración en la zona este de la zona conurbada y en general una distribución baja esa fecha, la figura 66 muestra una distribución baja en general a excepción de la zona centro y por último en la figura 67 se aprecian valores bajos en toda el área de estudio y en general en el VSLP.

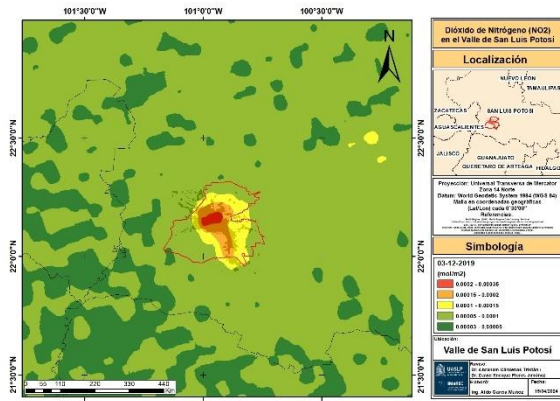


Figura 64. Mapa de interpolación de NO<sub>2</sub> del Sensor Sentinel – 5P en el VSLP el 3 de diciembre de 2019.

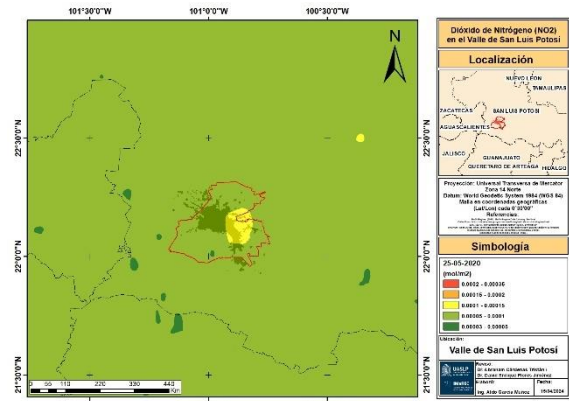


Figura 65. Mapa de interpolación de NO<sub>2</sub> del Sensor Sentinel – 5P en el VSLP el 25 de mayo de 2020.

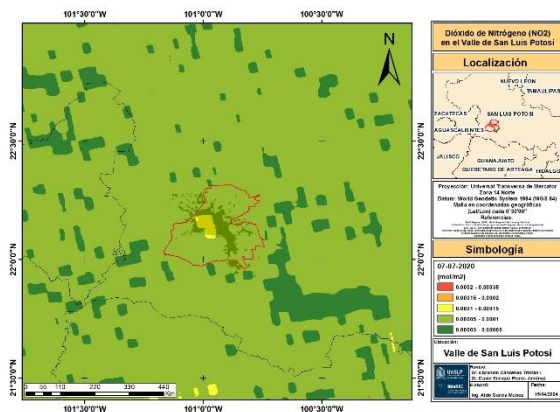


Figura 66. Mapa de interpolación de NO<sub>2</sub> del Sensor Sentinel – 5P en el VSLP el 7 de julio de 2020.

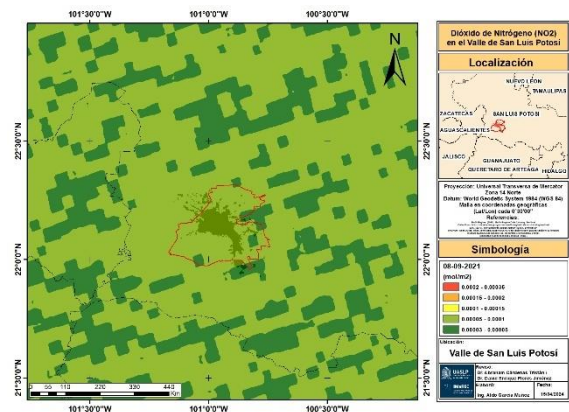


Figura 67. Mapa de interpolación de NO<sub>2</sub> del Sensor Sentinel – 5P en el VSLP el 8 de septiembre de 2021.

A continuación, se presentan los mapas derivados de las interpolaciones en las que se registraron los valores más elevados de NO<sub>2</sub> en el VSLP, se analizaron seis fechas, cinco de ellas pertenecen a la estación de invierno y una a la estación de otoño.

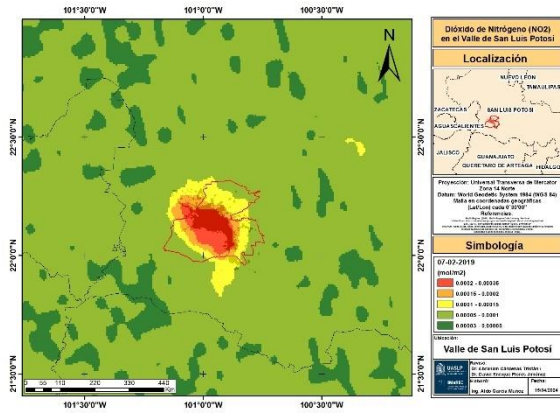


Figura 68. Mapa de interpolación de NO<sub>2</sub> del Sensor Sentinel – 5P en el VSLP el 7 de febrero de 2019.

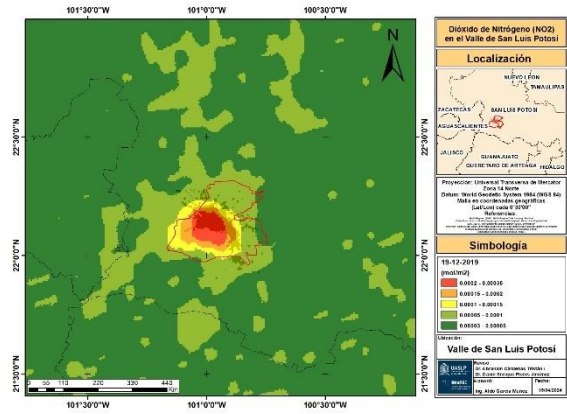


Figura 69. Mapa de interpolación de NO<sub>2</sub> del Sensor Sentinel – 5P en el VSLP el 19 de diciembre de 2019.

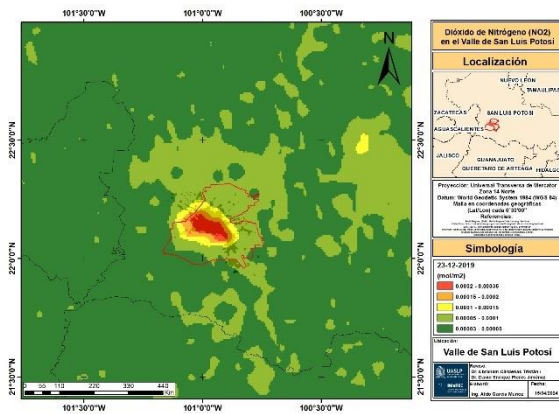


Figura 70. Mapa de interpolación de NO<sub>2</sub> del Sensor Sentinel – 5P en el VSLP el 23 de diciembre de 2019.

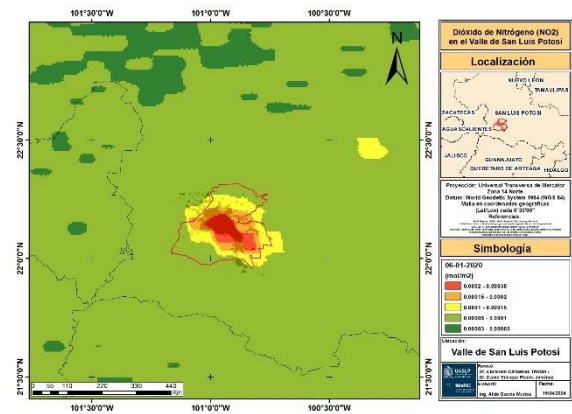


Figura 71. Mapa de interpolación de NO<sub>2</sub> del Sensor Sentinel – 5P en el VSLP el 6 de enero de 2020.

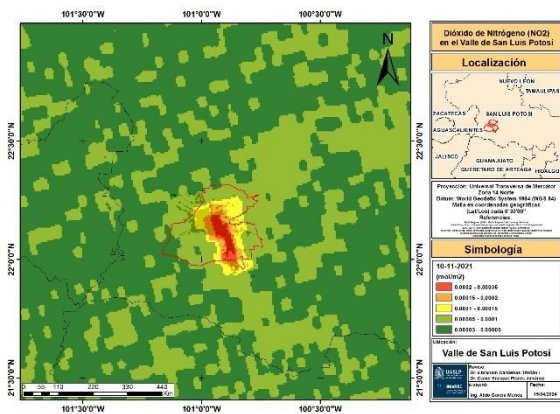


Figura 72. Mapa de interpolación de NO<sub>2</sub> del Sensor Sentinel – 5P en el VSLP el 10 de noviembre de 2021.

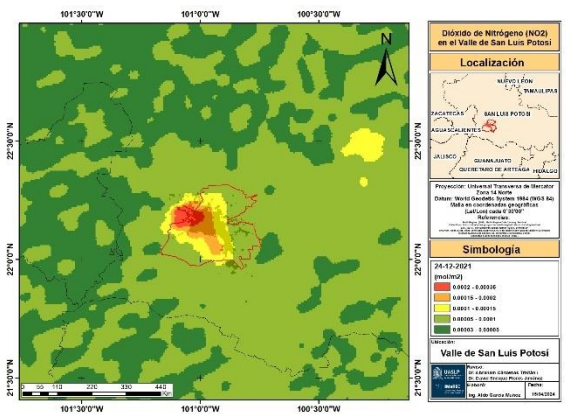


Figura 73. Mapa de interpolación de NO<sub>2</sub> del Sensor Sentinel – 5P en el VSLP el 24 de diciembre de 2021.

Como se puede apreciar de la figura 68 a la 73 las seis fechas tienen un patrón similar en cuanto a la distribución del NO<sub>2</sub> las concentraciones más altas de este gas están

en la parte central del valle y cubren la mayor parte de la mancha urbana de SLP, en su mayoría en la parte centro y norte de la zona metropolitana, tomando en cuenta que las fechas analizadas corresponden a distintos años se puede apreciar que tienen características muy similares, los pixeles rojos representan (concentración muy alta) que oscilan entre 0.0002-0.00035 mol/m<sup>2</sup>, naranjas (concentración alta) entre 0.00015–0.0002 mol/m<sup>2</sup>, amarillos (concentración moderada) 0.0001-0.00015 mol/m<sup>2</sup>, verde claro (concentración baja) de 0.00005-0.0001 mol/m<sup>2</sup> y en verde oscuro (concentración muy baja). Estos resultados se representan con esas tonalidades para que se permita apreciar a manera de semáforo el riesgo de las concentraciones del gas contaminante en el VSLP.

## **5. CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE VARIABILIDAD CLÍMATICA EN EL VSLP PARA EL PERIODO 1980-2021.**

### **5.1 Actividades económicas y cambio de uso de suelo en el VSLP.**

San Luis Potosí es un estado que se ha desarrollado en diversos ámbitos económicos, según el informe de la Secretaría del Trabajo y Previsión Social en 2022, la producción de la entidad aporta el 2.1% al PIB nacional ocupando la posición número 18, las principales actividades económicas en el estado son la Industria Manufacturera (28.7%), Servicios Profesionales, Financieros y corporativos (20.7%) y el Comercio (16%). A nivel nacional el municipio de Villa de Reyes encabeza la lista de municipios que mayor valor agregado genera, la capital potosina ocupa el lugar número 13, esto se debe al desarrollo del industrial en la región el cual emplea al mayor número de personas en el estado en su mayoría a la construcción, reconstrucción y ensamble de equipos de transporte, maquinaria, entre otros, en febrero de 2023 la Asociación Mexicana de Parques Industriales (AMPIP) registro 8 parques industriales todos ubicados en esos dos municipios (SEDECO, 2024), ciertamente el desarrollo industrial induce una fuerte reactivación socioeconómica y mejoras en la calidad de vida de la población, por otro lado puede provocar importantes modificaciones que ocasionan el desequilibrio de ecosistemas, diversas formas de contaminación y otros problemas ambientales y sociales, (Suárez et al 2014), la expansión urbana y el aumento de sus habitantes son una consecuencia natural del desarrollo industrial en una zona determinada.

El crecimiento de la población predomina en las áreas urbanas. Mas de la mitad de la población vive en ciudades (UN, 2016), ese incremento provoca la expansión de la mancha urbana y con ello el cambio de uso de suelo y vegetación. Algunas de las principales implicaciones del crecimiento urbano acelerado, fragmentado y poco planificado en el VSLP es la disminución del paisaje natural y, con ello alteraciones en la calidad del aire, abasto de agua, erosión e inundaciones, tan solo entre 1997 y 2000, la superficie urbana creció por encima de 4% en promedio anual, sin embargo, el área verde decreció, (Alva y Martínez, 2018).

| Superficie      | Superficie (ha) |        |        |        |        | Tasa de crecimiento medio anual |           |           |           |
|-----------------|-----------------|--------|--------|--------|--------|---------------------------------|-----------|-----------|-----------|
|                 | 1997            | 2000   | 2005   | 2010   | 2017   | 1997-2000                       | 2000-2005 | 2005-2010 | 2010-2017 |
| Área urbana     | 15 053          | 17 086 | 17 300 | 18 444 | 23 599 | 4.31%                           | 0.25%     | 1.29%     | 3.58%     |
| Paisaje natural | 34 778          | 32 746 | 32 531 | 31 388 | 26 232 | -1.99%                          | -0.13%    | -0.71%    | -2.53%    |

Tabla 36. AMSLP, superficie urbana y del paisaje, 2017.

Otra consecuencia importante son los cambios en el clima de la región, la alteración de un ecosistema, específicamente de la cobertura de la superficie de la tierra por cambios en el uso de suelo y vegetación se ha convertido en una de las fuerzas impulsoras del cambio climático (Silva, 2022).

## 5.2 Insumos y análisis de variabilidad climática

En la actualidad existen muchas herramientas para medir el clima en el mundo, gracias al desarrollo tecnológico y las inclemencias del tiempo la sociedad ha realizado esfuerzos para desarrollarse en este ámbito debido a los desastres naturales, ondas de calor, frentes fríos, inversiones térmicas o el peligro del cambio climático. Hoy en día existen tecnologías como modelos de pronóstico complejos, drones, estaciones meteorológicas fijas y móviles, globos de radio sondeo, entre otros para medir el tiempo-clima, sin embargo, al momento de realizar análisis de variabilidad climática las herramientas disponibles varían dependiendo de la zona de estudio, de manera que dos de las herramientas disponibles para realizar análisis de datos históricos son las estaciones climatológicas terrestres y las estimaciones satelitales. En el caso de las primeras, la información disponible no es homogénea en cuanto a los datos históricos para la zona de estudio y están distribuidas a distancias que superan las decenas de kilómetros, lo que dificulta los detalles en escalas menores, por lo que las estimaciones satelitales son una alternativa ya que pueden proporcionar información de sitios en los cuales no se cuenta con estaciones fijas.

La fuente de datos utilizados en este trabajo es el reanálisis de quinta generación del ECMWF (Centro de Europeo de Predicción a medio plazo) ERA-5 que cuenta con datos disponibles desde la década de 1940 en adelante y cuenta con una resolución

de 9.6 km, en este caso la información se obtuvo en la aplicación Climate Engine que utiliza la plataforma de Google Earth Engine para procesar datos satelitales de manera dinámica y eficiente.

La información se descarga dependiendo de las necesidades de cada usuario, en este caso las imágenes se obtuvieron en formato .TIFF para poder manejarlas dentro del Sistema de Información Geográfica ArcMap, tomando en cuenta que el periodo de análisis para obtener las cuencas atmosféricas, la distribución del dióxido de nitrógeno y el análisis de las correlaciones fue durante 2019-2021 se calcularon anomalías climáticas de las cuatro estaciones del año 2021 con respecto a las cuatro décadas anteriores y se analizaron diferencias climáticas entre el periodo de (1980-2000) y (2001-2021).

La detección de cambios climáticos requiere examinar las variaciones en las estadísticas climatológicas de un periodo específico en comparación con los valores promedio a largo plazo. Para estimar las variaciones del clima, se utilizaron cálculos de anomalías climáticas, las cuales representan las desviaciones de una variable climática respecto al promedio hiperanual calculado a partir de una serie de datos de al menos 30 años (Brown-Manrique et al., 2015).

$$A_x = X_i - X_m$$

*Ecuación 1. Anomalía climática para la variable X.*

$A_x$  = Anomalía climática para la variable  $X$  en estudio.

$X_i$  = Valor de la variable para el año  $i$ .

$X_m$  = Media aritmética hiperanual de la serie de datos.

$$Dx = X_m - X'_m$$

*Ecuación 2. Diferencia climática para la variable X.*

Del mismo modo para reconocer las diferencias en las condiciones climatológicas promedio entre distintos periodos, se realiza una resta entre la media aritmética del periodo de referencia y la del segundo periodo a comparar (Bernhardt et al., 2018).

Donde:

$Dx$  = Diferencia climática para la variable X en el estudio.

$X_m$  = Media aritmética del periodo base.

$X'_m$  = Media aritmética del periodo 2.

### 5.3 Análisis de diferencia climática de temperatura mínima en el VSLP entre el periodo de (1980-2000) y (2001-2021).

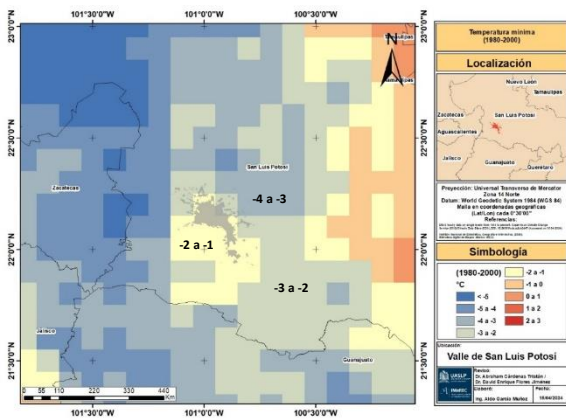


Figura 74. Temperatura mínima del periodo (1980-2000).

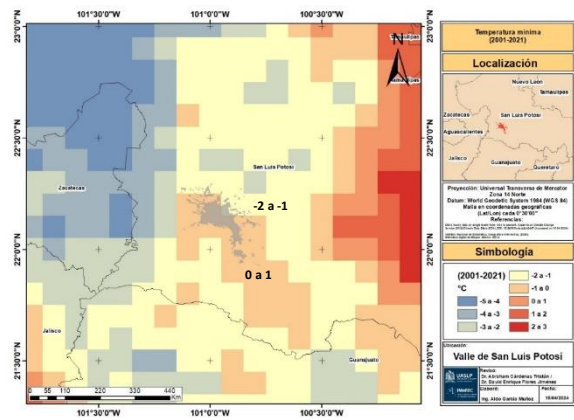


Figura 75. Temperatura mínima del periodo (2001-2021).

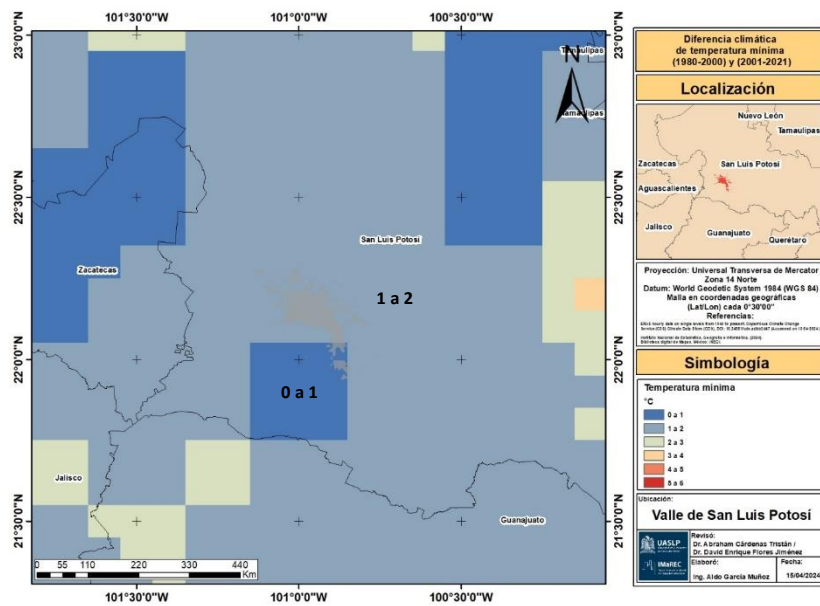


Figura 76. Diferencia climática de temperatura mínima entre el periodo de (1980-2000) y (2001-2021).

En el periodo 1980-2000 (figura 74) la temperatura mínima registrada en el VSLP fue de  $-2^{\circ}\text{C}$  a  $-1^{\circ}\text{C}$ , mientras que en 2001-2021 (figura 75)  $-2^{\circ}\text{C}$  a  $-1^{\circ}\text{C}$  a  $0^{\circ}\text{C}$ , la diferencia climática (figura 76) entre ambos periodos esta entre  $1$  a  $2^{\circ}\text{C}$  en la mayor parte del VSLP y  $0$  a  $1^{\circ}\text{C}$  en la zona donde se ubica la sierra de San Miguelito.

### 5.4 Análisis de diferencia climática de temperatura máxima en el VSLP entre el periodo de (1980-2000) y (2001-2021).

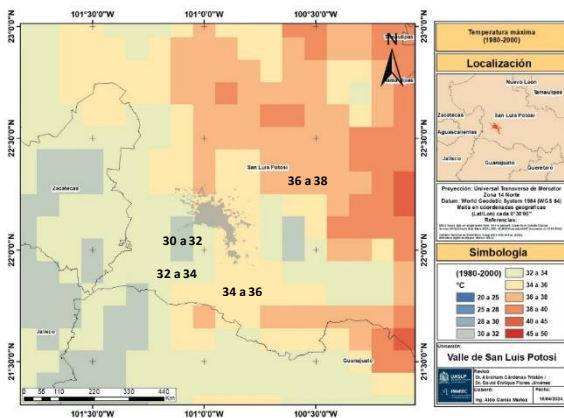


Figura 77. Temperatura máxima del periodo (1980-2000).

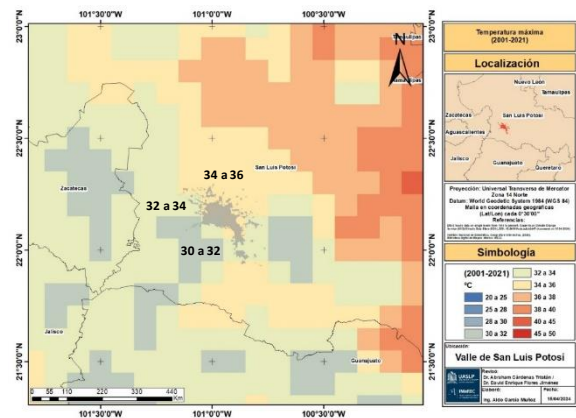


Figura 78. Temperatura máxima del periodo (2001-2021).

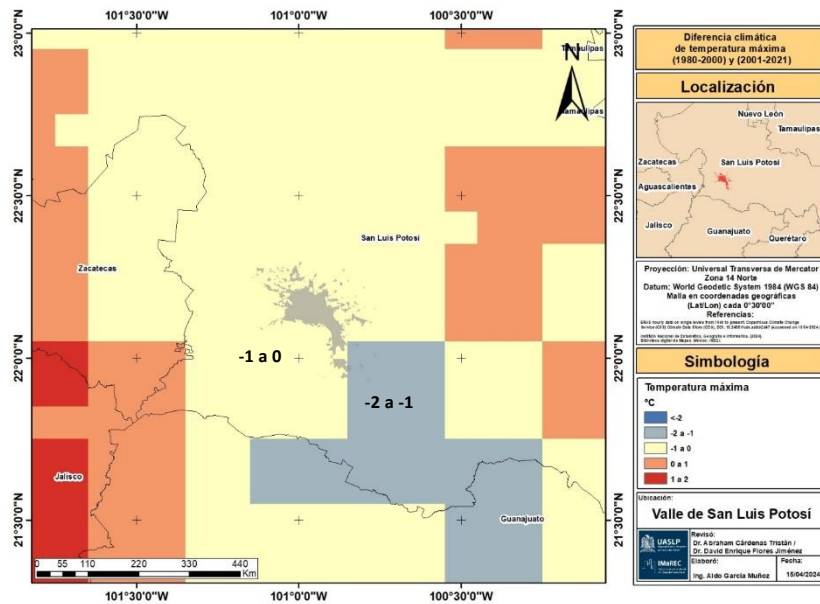


Figura 79. Diferencia climática de temperatura máxima entre el periodo de (1980-2000) y (2001-2021).

En el periodo 1980-2000 (figura 77) la temperatura máxima registrada en el VSLP fue de 32°C a 36°C, mientras que en 2001-2021 (figura 78) 30°C a 36°C, la diferencia climática (figura 79) entre ambos periodos esta entre -1°C a 0°C en la mayor parte del VSLP y -2°C a -1°C en la zona sur alrededor del municipio de Zaragoza.

### 5.5 Análisis de diferencia climática de precipitación en el VSLP entre el periodo de (1980-2000) y (2001-2021).

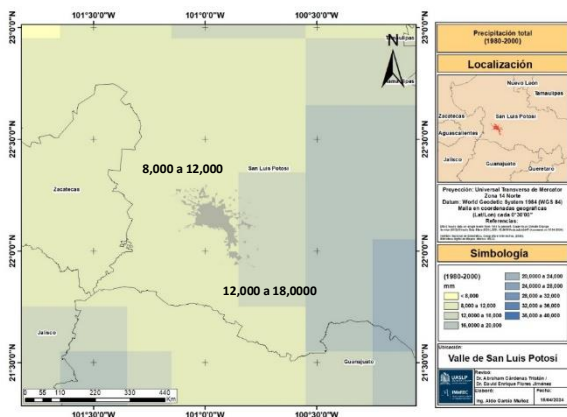


Figura 80. Precipitación total del periodo (1980-2000).

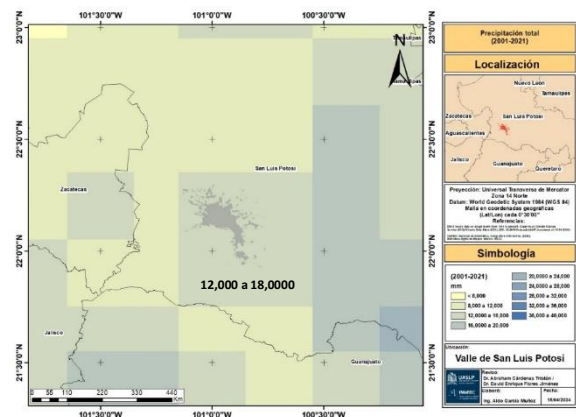


Figura 81. Precipitación total del periodo (2001-2021).

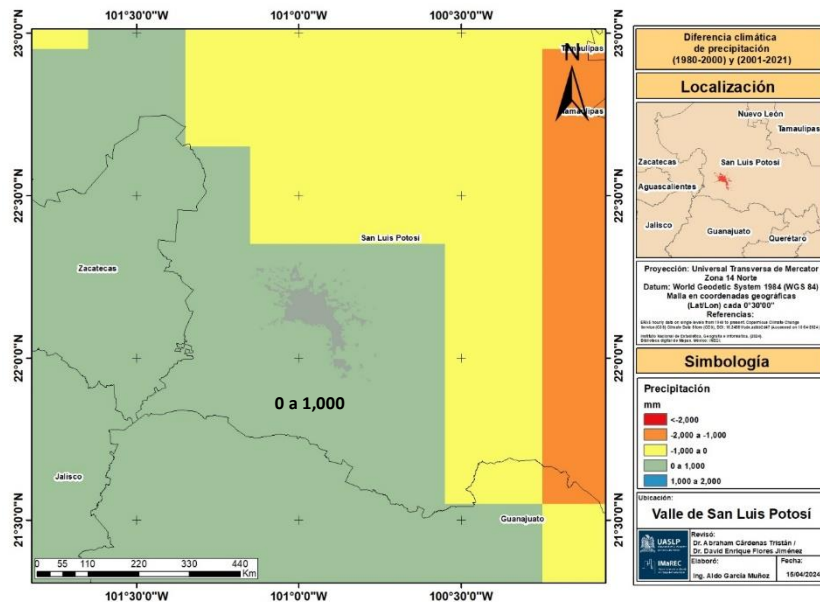


Figura 82. Diferencia climática de precipitación entre el periodo de (1980-2000) y (2001-2021).

En el periodo 1980-2000 (figura 80) la precipitación total en el VSLP fue de 8,000 a 12,000mm, mientras que en 2001-2021 (figura 81) 12,000 a 18,000mm, la diferencia climática (figura 82) entre ambos periodos esta entre 0 a 1,000mm en la mayor parte del VSLP.

### 5.6 Análisis de diferencia climática de velocidad de viento máxima en el VSLP entre el periodo de (1980-2000) y (2001-2021).

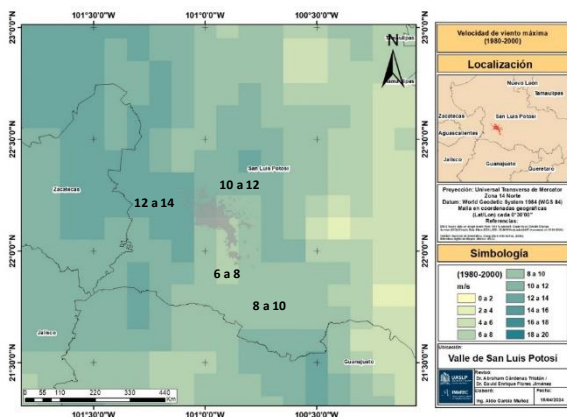


Figura 83. Velocidad de viento máxima del periodo (1980-2000).

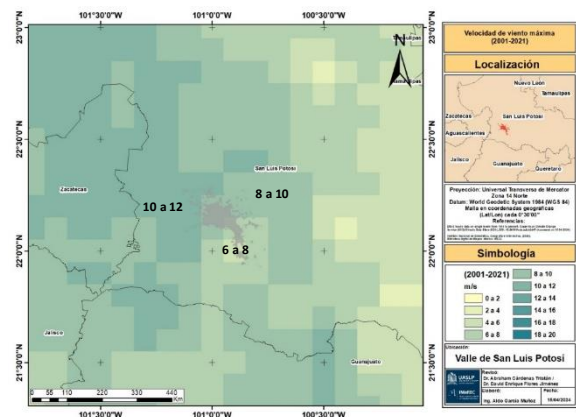


Figura 84. Velocidad de viento máxima del periodo (2001-2021).

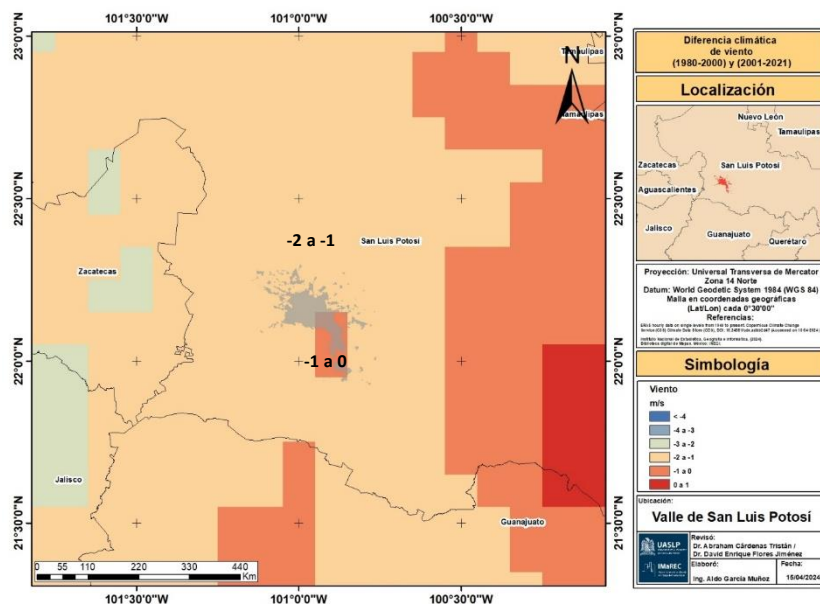


Figura 85. Diferencia climática de velocidad de viento máxima entre el periodo de (1980-2000) y (2001-2021).

En el periodo 1980-2000 (figura 83) la velocidad de viento máxima registrada en el VSLP fue de 6 a 14 m/s, mientras que en 2001-2021 (figura 84) 6 a 12 m/s, la diferencia climática (figura 85) entre ambos periodos esta entre -2 y 0 m/s en la mayor parte del VSLP.

### 5.7 Anomalías climáticas de temperatura mínima en el VSLP de las temporadas del clima de (2020-2021) con respecto al promedio climatológico (1980-2021).

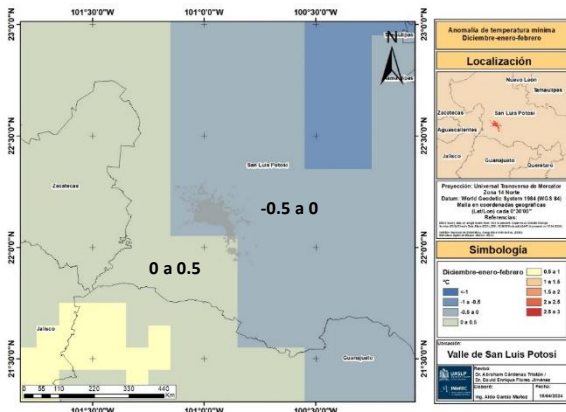


Figura 86. Anomalía de temperatura mínima (diferencia de temperatura mínima de 1-dic-2020 al 28-feb-2021 con respecto al promedio histórico de 1980-2021).

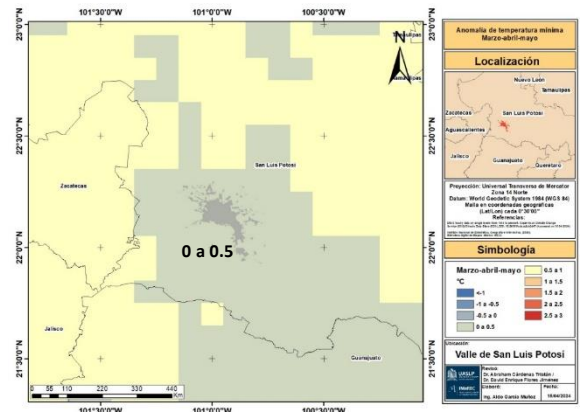


Figura 87. Anomalía de temperatura mínima (diferencia de temperatura mínima de 1-mar-2021 al 31-may-2021 con respecto al promedio histórico de 1980-2021).

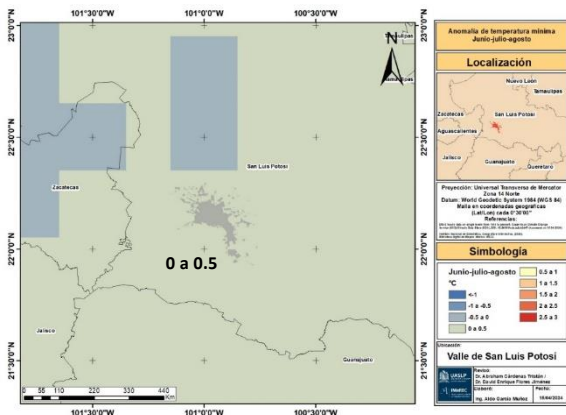


Figura 88. Anomalía de temperatura mínima (diferencia de temperatura mínima de 1-jun-2021 al 31-ago-2021 con respecto al promedio histórico de 1980-2021).

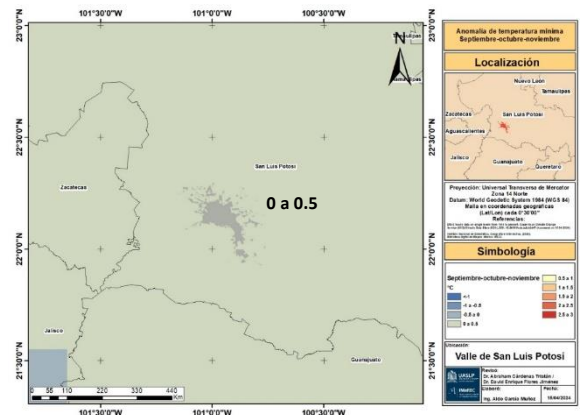


Figura 89. Anomalía de temperatura mínima (diferencia de temperatura mínima de 1-sep-2021 al 30-nov-2021 con respecto al promedio histórico de 1980-2021).

La anomalía de temperatura mínima en la mayor parte del VSLP en la temporada de invierno (figura 86) fue de -1 a 0°C, primavera (figura 87), verano (figura 88) y otoño (figura 89) 0 a 0.5°C.

## 5.8 Anomalías climáticas de temperatura máxima en el VSLP de las temporadas del clima de (2020-2021) con respecto al promedio climatológico (1980-2021).

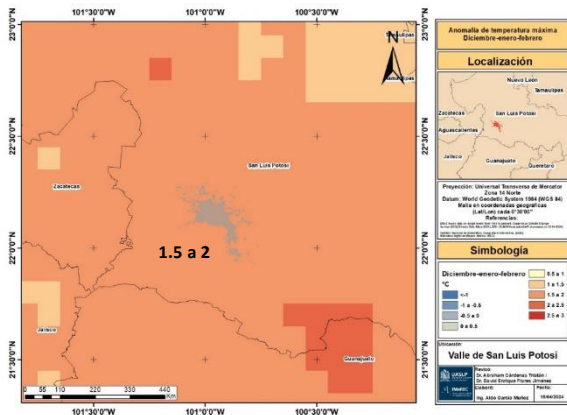


Figura 90. Anomalía de temperatura máxima (diferencia de temperatura máxima de 1-dic-2020 al 28-feb-2021 con respecto al promedio histórico de 1980-2021).

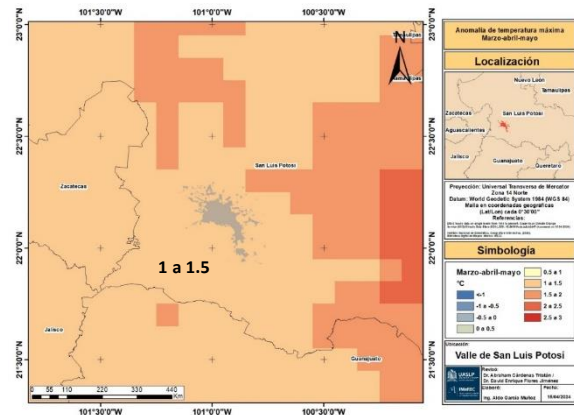


Figura 91. Anomalía de temperatura máxima (diferencia de temperatura máxima de 1-mar-2021 al 31-may-2021 con respecto al promedio histórico de 1980-2021).

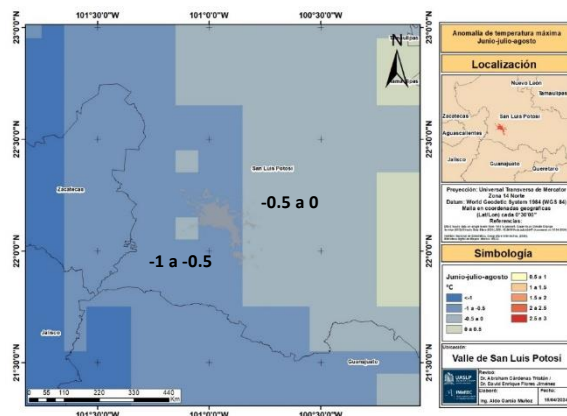


Figura 92. Anomalía de temperatura máxima (diferencia de temperatura máxima de 1-jun-2021 al 31-ago-2021 con respecto al promedio histórico de 1980-2021).

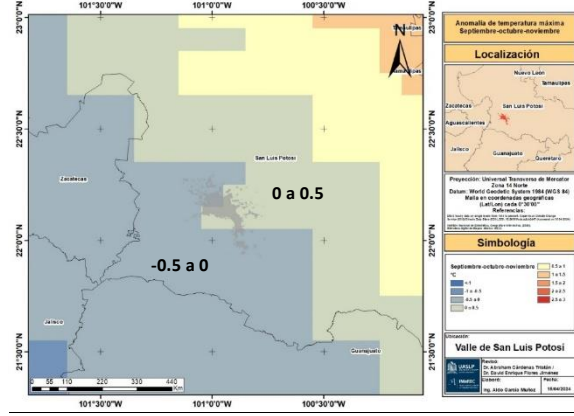


Figura 93. Anomalía de temperatura máxima (diferencia de temperatura máxima de 1-sep-2021 al 30-nov-2021 con respecto al promedio histórico de 1980-2021).

La anomalía de temperatura máxima en la mayor parte del VSLP en la temporada de invierno (figura 90) fue de 1.5 a 2°C, 1 a 1.5°C en primavera (figura 91), -1 a 0°C en verano (figura 92) y -0.5 a 0.5°C en otoño (figura 93).

## 5.9 Anomalías climáticas de temperatura media en el VSLP de las temporadas del clima de (2020-2021) con respecto al promedio climatológico (1980-2021).

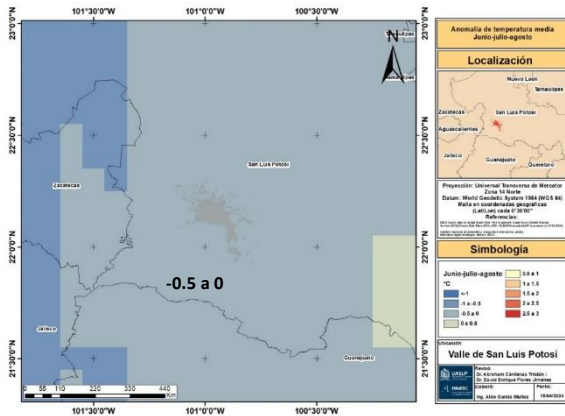


Figura 94. Anomalía de temperatura media (diferencia de temperatura media de 1-dic-2020 al 28-feb-2021 con respecto al promedio histórico de 1980-2021).

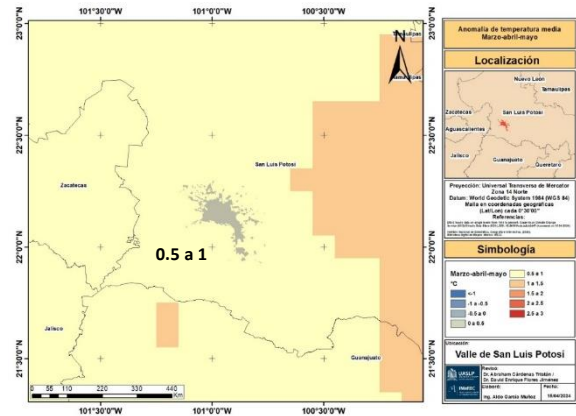


Figura 95. Anomalía de temperatura media (diferencia de temperatura media de 1-mar-2021 al 31-may-2021 con respecto al promedio histórico de 1980-2021).

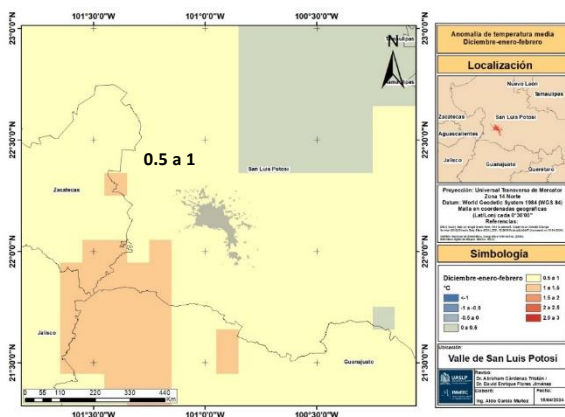


Figura 96. Anomalía de temperatura media (diferencia de temperatura media de 1-jun-2021 al 31-ago-2021 con respecto al promedio histórico de 1980-2021).

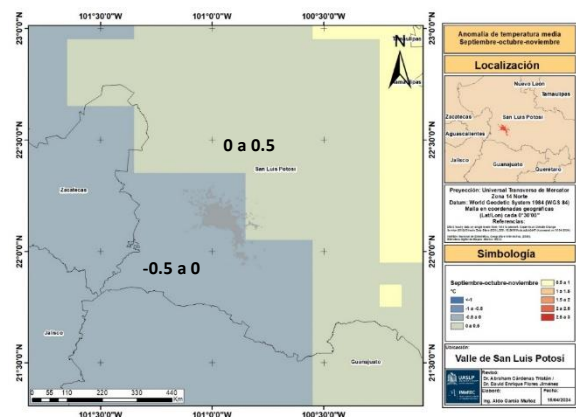


Figura 97. Anomalía de temperatura media (diferencia de temperatura media de 1-sep-2021 al 30-nov-2021 con respecto al promedio histórico de 1980-2021).

La anomalía de temperatura media en la mayor parte del VSLP en la temporada de invierno (figura 94) fue de  $-0.5$  a  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $0.5$  a  $1^{\circ}\text{C}$  en primavera (figura 95),  $0.5$  a  $1^{\circ}\text{C}$  en verano (figura 96) y  $-0.5$  a  $0.5^{\circ}\text{C}$  en otoño (figura 97).

## 5.9 Anomalías climáticas de precipitación en el VSLP de las temporadas del clima de (2020-2021) con respecto al promedio climatológico (1980-2021).

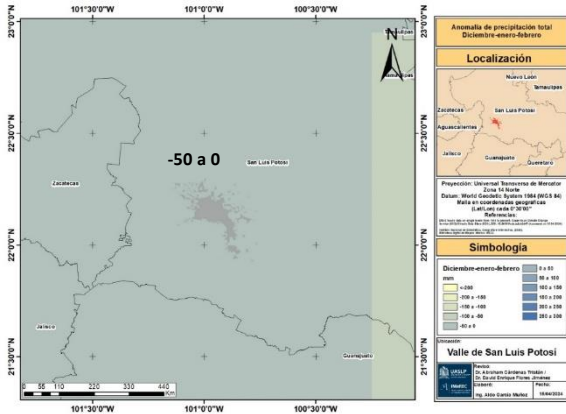


Figura 98. Anomalía de precipitación de invierno (diferencia de precipitación acumulada de 1-dic-2020 al 28-feb-2021 con respecto al promedio histórico de 1980-2021).

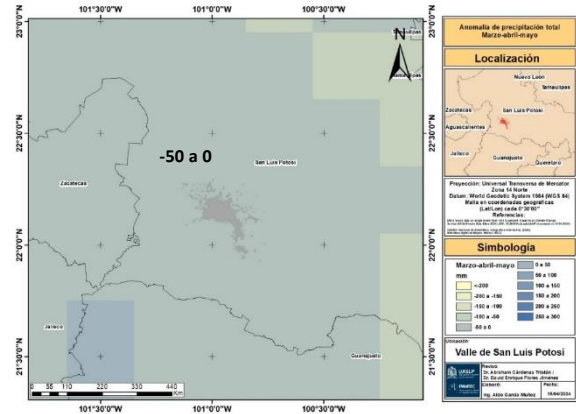


Figura 99. Anomalía de precipitación de primavera (diferencia de precipitación acumulada de 1-mar-2021 al 31-may-2021 con respecto al promedio histórico de 1980-2021).

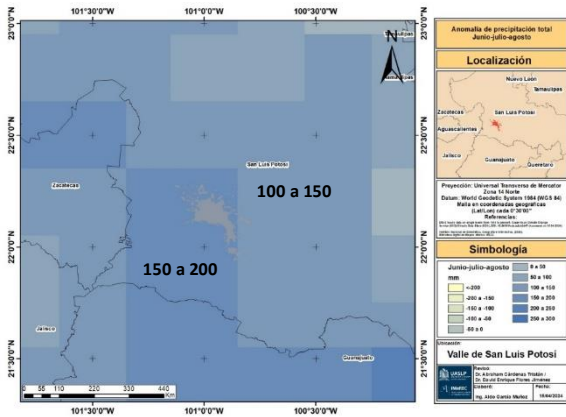


Figura 100. Anomalía de precipitación del verano (diferencia de precipitación acumulada de 1-jun-2021 al 31-ago-2021 con respecto al promedio histórico de 1980-2021).

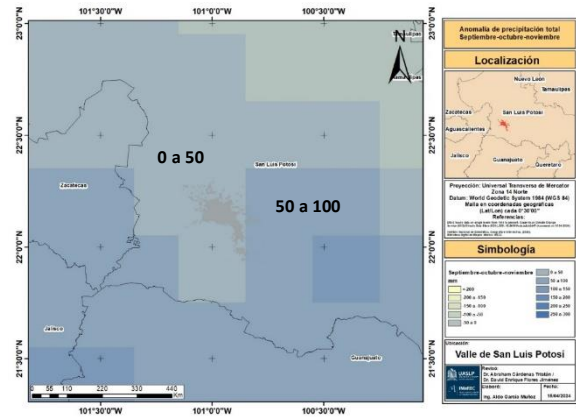


Figura 101. Anomalía de precipitación de otoño (diferencia de precipitación acumulada de 1-sep-2021 al 30-nov-2021 con respecto al promedio histórico de 1980-2021).

La anomalía de precipitación total en la mayor parte del VSLP en la temporada de invierno (figura 98) y primavera (figura 99) fue de -50 a 0mm, en verano (figura 100) 100 a 200mm y 0 a 100mm en otoño (figura 101).

## 6. CONCLUSIONES

La caracterización de las cuencas atmosféricas analizadas para las fechas de las cuatro temporadas presentó diferencias en la delimitación de los polígonos debido a la trayectoria de los vientos y las concentraciones de NO<sub>2</sub>, las cuales fueron más elevadas en la temporada invernal a diferencia del resto de las fechas seleccionadas, esto refuerza que cada cuenca atmosférica debe entenderse como una unidad dinámica, donde su delimitación y comportamiento pueden variar temporalmente debido a los distintos fenómenos meteorológicos y a las características de la zona de estudio. En síntesis, las seis fechas donde se registraron concentraciones altas de NO<sub>2</sub> sobre la zona conurbada corresponden a la temporada invernal y una pertenece a la temporada de otoño.

El análisis comparativo del dióxido de nitrógeno NO<sub>2</sub> en el VSLP, utilizando datos satelitales del sensor TROPOMI del Sentinel-5P junto con información de estaciones de monitoreo en suelo, demuestra que la percepción remota/teledetección es una herramienta eficaz para complementar los sistemas tradicionales de monitoreo de calidad del aire. Las correlaciones de Pearson revelan en su mayoría relaciones estadísticas moderadas positivas en las cuatro semanas analizadas, donde el coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> fue superior a 0.50, o bien, 50% de la variabilidad observada en los datos satelitales puede ser explicada por los datos capturados en superficie por las casetas de monitoreo y el restante podría estar atribuido a otros factores no considerados en el modelo; particularmente las casetas de monitoreo del DIF e IPAC presentaron correlaciones moderadas positivas, lo que sugiere que los datos satelitales reflejan adecuadamente las concentraciones en superficie, aunque existen limitaciones en cuanto a la disponibilidad y continuidad de datos en dichas estaciones terrestres. Así mismo las correlaciones entre NO<sub>2</sub> y las variables meteorológicas disponibles en cada caseta de monitoreo presentaron correlaciones moderadas positivas durante las cuatro semanas analizadas, lo que sugiere que a mayor temperatura tienden a registrarse mayores concentraciones de NO<sub>2</sub>; respecto a la humedad relativa se registraron correlaciones débiles negativas durante la semana de invierno; correlaciones fuertes positivas durante la semana de primavera; débiles positivas durante la semana de verano; y finalmente moderadas positivas en la semana de otoño. Un área de oportunidad para futuros estudios es realizar análisis

multivariadas en donde las concentraciones en superficie (variable dependiente) sean representadas simultáneamente por los datos satelitales y meteorológicos (variables independientes). La radiación solar presentó en su mayoría correlaciones negativas con el contaminante de interés, lo que sugiere que a mayores niveles de radiación solar las concentraciones de  $\text{NO}_2$  tienden a disminuir debido a que las reacciones fotoquímicas disocian dicho contaminante favoreciendo la formación de ozono troposférico, responsable del smog fotoquímico; y por último la presión barométrica presentó correlaciones negativas con el dióxido de nitrógeno en las semanas de invierno, verano y otoño, mientras que fue positiva durante la semana de primavera. Esto implica que, al aumentar la presión barométrica se pueden estar favoreciendo condiciones atmosféricas más estables en donde es más difícil que se disipen los contaminantes, ya que la velocidad del viento tiende a disminuir.

En cuanto al análisis geoestadístico se evidenció una mayor concentración de  $\text{NO}_2$  en la zona central y norte del VSLP, especialmente en invierno y primavera. Los métodos de Kriging permitieron identificar patrones espaciales consistentes entre temporadas y años, indicando una tendencia recurrente en la distribución del contaminante especialmente durante la temporada invernal, lo que puede estar influenciado por inversiones térmicas y la poca radiación solar, siendo en esta temporada cuando se presentan mayores concentraciones de  $\text{NO}_2$ .

Respecto a la variabilidad climática, se identificaron diferencias importantes en temperatura, precipitación y viento entre los periodos 1980–2000 y 2001–2021. Estas variaciones, junto con los cambios en el uso del suelo y el crecimiento urbano-industrial, podrían estar asociados al incremento en las emisiones de  $\text{NO}_2$ , producto de mayores actividades antropogénicas como tráfico vehicular, crecimiento industrial y quemadas agrícolas.

Estos resultados en conjunto permiten tener un panorama más completo de la dinámica del  $\text{NO}_2$  en el VSLP, destacando la importancia de poder contar en el futuro próximo con una infraestructura de monitoreo más robusta y continua, así como el uso de herramientas satelitales y geoestadísticas en el análisis ambiental con el fin de complementar los diagnósticos realizados por las casetas de monitoreo. Tomando en cuenta que se analizó uno de los contaminantes que contaba con más información de manera continua en las casetas de monitoreo, se recomienda reforzar el sistema de

monitoreo en el VSLP incrementando el número de estaciones y mejorando la continuidad de los datos recolectados, lo que sería de utilidad para considerar otras variables tanto atmosféricas como climáticas.

Del mismo modo, si se quiere modelar con precisión espacial y temporal las cuencas atmosféricas, se recomienda hacer casos de estudio en particular donde se analice un horario específico para evaluar sus dimensiones y la concentración de los contaminantes en dicho momento. Finalmente, se debe considerar la posibilidad de integrar el monitoreo satelital en el estado, aprovechando la cobertura espacial y temporal de las imágenes satelitales disponibles, lo que puede ser de gran utilidad para generar una base de datos más robusta con información histórica y actualizada para fortalecer los protocolos de validación cruzada entre los datos satelitales y terrestres.

Por último, este análisis puede ser un área de oportunidad para futuras investigaciones para analizar el comportamiento de la altura de la capa límite o capa de mezcla, ya que esta información puede complementar la comprensión de las cuencas atmosféricas, así como en investigaciones interdisciplinarias como movilidad sostenible y reducción de emisiones, para impulsar estrategias de transporte público eficiente con el fin de disminuir el crecimiento del parque vehicular y la generación de emisiones, uso de energías limpias y de eficiencia energética o vincular los resultados con el marco regulatorio vigente para fortalecer las normas de calidad del aire.

## 7. REFERENCIAS

- Alva Fuentes, B., & Martínez Torres, Y. (2018).** Crecimiento urbano y su impacto en el paisaje natural. El caso del Área Metropolitana de San Luis Potosí, México. *Realidad, datos y espacio. Revista Internacional de Estadística y Geografía*, 9(2).
- Alvarado, W. R. (2011).** Modelo geoestadístico espacio-temporal del crimen en el Salvador: análisis estructural y predictivo. *Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones*, 18(2), 325-342.
- Arboleda Guerrero, Á., & Vásquez Taco, D. (2021).** Evaluación de datos satelitales TROPOMI para la calidad del aire en Quito. Tesis de grado, Universidad Central del Ecuador.
- Barrera Huertas, H. A., Torres Jardón, R., Ruíz Suárez, L. G., Santos García Yee, J., Torres Jaramillo, A., Martínez Bolívar, A. P., ... & García Reynoso, J. A. (2019).** Análisis del transporte de ozono en la cuenca atmosférica de Puebla-Tlaxcala en el centro de México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 35(4), 869-888.
- Bechle, M. J., Millet, D. B., & Marshall, J. D. (2013).** Remote sensing of NO<sub>2</sub>: A spatial tool for urban air pollution exposure assessment. *Environmental Science & Technology*, 47(14), 7721–7728.
- Beloconi, A., Chrysoulakis, N., Lyapustin, A., Utzinger, J., & Vounatsou, A. (2018).** Bayesian geostatistical modelling of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub>
- Bernhardt, J., Carleton, A. M., & LaMagna, C. (2018).** A comparison of daily temperature-averaging methods: Spatial variability and recent change for the CONUS. *Journal of Climate*, 31(3), 979-996.
- Berumen-Rodríguez, A. A., Pérez-Vázquez, F. J., Díaz-Barriga, F., Márquez-Mireles, L. E., & Flores-Ramírez, R. (2021).** Revisión del impacto del sector ladrillero sobre el ambiente y la salud humana en México. *Salud pública de México*, 63(1), 100-108.
- Caetano, E., Magaña, V. (2007).** Identificación de Cuencas Atmosféricas en México. Instituto Nacional de Ecología.

**Casillas-Higuera, A., García-Cueto, R., Camacho, O., & Gonzalez-Navarro, F. F. (2014).** Detección de la Isla Urbana de Calor mediante Modelado Dinámico en Mexicali, BC, México. *Información tecnológica*, 25(1), 139-150.

**Chuvienco, E. (1996).** Fundamentos de teledetección espacial (No. 526.982 C564 1996). Ediciones Rialp.

**Comisión Ambiental de la Megalópolis (2017).** Programa de gestión federal para mejorar la calidad del aire de la megalópolis ProAire de la megalópolis 2017-2030. Ciudad de México.

**Diario Oficial de la Federación (DOF). (1994).** NOM-023-SSA1-1993. Salud ambiental. Criterios para evaluar la calidad del aire con respecto al dióxido de nitrógeno. Recuperado de: <https://www.dof.gob.mx>

**Earth Engine. (2018).** Earth Engine Data Catalog. Sentinel Collections. <https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/sentinel>

**Engine, G. E. (2018).** Earth Engine Code Editor. <https://code.earthengine.google.com>

**ESA. (2017).** The European Space Agency (ESA). Sentinel-5P TROPOMI User Guide. <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-5p-tropomi>

**ESA. (2020).** Sentinel-5P Overview. Agencia Espacial Europea. <https://sentinels.copernicus.eu>

**Eskes, H. J., van Geffen, J. H. G. M., Boersma, K. F., & Veefkind, J. P. (2019).** TROPOMI NO<sub>2</sub> product: Algorithm theoretical basis document (ATBD). Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI). Recuperado de: <https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/3541451/Sentinel-5P-TROPOMI-ATBD-NO2>

**ESRI. (2016).** Comparar métodos de interpolación. Recuperado de <http://desktop.arcgis.com/es/>

**Federal, G. (2001).** Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. Diario Oficial de la Federación, 10.

**Forero Castro, D. D. (2019).** Metodología para la incorporación de datos del sensor TROPOMI del satélite Sentinel-5P al monitoreo de la calidad del aire en Bogotá. Tesis de maestría. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

**García de Miranda, E. (1981).** Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen: para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana.

**García Reynoso, J.A., Ruiz Suárez., L.G., García Escalante, S., N.A., R.J. (2009).** Comportamiento de los contaminantes en cuencas atmosféricas: metodología y estudio de caso. Instituto Nacional de Economía, México, DF.

**Garnier-Villarreal, M. (2022).** Introducción al análisis geoestadístico de datos en geociencias: teoría y aplicación. *Revista Geológica de América Central*, (67), 29-51.

**Giraldo, R. (2012).** Introducción a la Geoestadística teórica y aplicada. Medellín, Universidad Nacional de Colombia.

**Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017).** Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27.

**Granados Sánchez, D., López Ríos, G. F., & Hernández García, M. Á. (2010).** La lluvia ácida y los ecosistemas forestales. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 16(2), 187-206.

**Hage, K. (2003).** On destructive Canadian Prairie windstorms and severe winters. *Natural Hazards*, 29(2), 207-228.

**Hernández-Garcés, A., Reynosa-Valladares, M., Hernández-Bilbao, F., & Canciano-Fernández, J. (2019).** Emisión de contaminantes atmosféricos procedentes de centrales azucareros santiagueros. *Tecnología Química*, 39(2), 390-402.

**Ialongo, I., Virta, H., Eskes, H., Hovila, J., & Douros, J. (2020).** Comparison of TROPOMI NO<sub>2</sub> with Pandora measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13, 205–218.

**INSST. (2018).** Fichas internacionales de seguridad química. Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo.

**KNMI. (2017).** Royal Netherlands Meteorological Institute – TROPOMI Instrument Description.

**Lalinde, J. D. H., Castro, F. E., Rodríguez, J. E., Rangel, J. G. C., Sierra, C. A. T., Torrado, M. K. A., ... & Pirela, V. J. B. (2018).** Sobre el uso adecuado del coeficiente de correlación de Pearson: definición, propiedades y suposiciones. Archivos venezolanos de Farmacología y Terapéutica, 37(5), 587-595.

**LGEEPA. (1988).** Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Extraído de <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/148.pdf>

**LGEEPA. (1988).** Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera. Diario Oficial de la Federación.

**Londoño Ciro, L. A., Ramírez Bolívar, J. R., Ramírez Bolívar, G. I., & Ordóñez Ante, C. A. (2010).** Modelo de interpolación espacial mediante sistemas de información geográfica para el estudio de la variabilidad espacial de la resistencia a la penetración del suelo. Dyna, 77(164), 109-118.

**López, D. (2014).** Gobernanza estratégica para la gestión de la calidad del aire en el estado de Baja California. Tijuana, B.C., México.

**Milton, J. S. (2001).** Estadística para Biología y Ciencias de la Salud. McGrawHill.

**Noyola, M. C. (2013).** Geoestadística Unidad 1. San Luis Potosí.

**Ocak, S., & Turalioglu, F. S. (2008).** Effect of meteorology on the atmospheric concentrations of pollutants in Erzurum, Turkey. Environmental Monitoring and Assessment, 144(1–3), 391–397.

**ONU. (2015).** Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Naciones Unidas. <https://sdgs.un.org/es/2030agenda>.

**Paraschiv, S., & Voiculescu, M. (2017).** Tropospheric NO<sub>2</sub> variability in Europe: A satellite and ground-based study. Atmospheric Environment, 152, 365–376.

**Petricoli, A., Blasi, M. G., Giovanelli, G., & Ravegnani, F. (2004).** NO<sub>2</sub> measurements by ground-based and satellite instruments in Northern Italy. Geophysical Research Letters, 31(5).

**Pope Iii, C. A., Burnett, R. T., Thun, M. J., Calle, E. E., Krewski, D., Ito, K., & Thurston, G. D. (2002).** Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *Jama*, 287(9), 1132-1141.

**Rolph, G., Stein, A., & Stunder, B. (2017).** Real-time Environmental Applications and Display sYstem: READY. *Environmental Modelling & Software*, 95, 210–228.  
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.025>

**SARAN, Secretaría de Ecología y Gestión Ambiental (SEGAM). (2018).** Actualización del inventario de emisiones y modelación de la calidad del aire en la Ciudad de San Luis Potosí,  
<https://slp.gob.mx/SEGAM/Documentos%20compartidos/ESTUDIOS%20PROGRAMAS%20Y%20PROYECTOS/Informe%20final%20Inventario%20y%20Modelaci%C3%B3n%20SLP%20final%20-%20para%20publicar.pdf>

**Schliep, E. M., Gelfand, A. E., & Holland, D. M. (2015).** Autoregressive spatially varying coefficients model for predicting daily PM 2.5 using VIIRS satellite AOT. *Advances in Statistical Climatology, Meteorology and Oceanography*, 1(1), 59.

**Secretaría de Energía de Argentina. (2020).** Estudio comparativo de calidad del aire en tiempos de COVID-19. Gobierno de Argentina.

**Semarnat. (2015).** Programa de gestión para mejorar la calidad del aire en la Zona Metropolitana de San Luis Potosí-Soledad de Graciano Sánchez. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

**Semarnat. (2018).** Estrategia Nacional de Calidad del Aire (ENCA).  
<https://www.gob.mx/semarnat/documentos/calidad-del-aire-98085>.

**Silva Gallegos, J. J. (2022).** Cambios en el uso de suelo en el estado de San Luis Potosí y su efecto sobre el clima. REPOSITORIO NACIONAL CONACYT.

**SMADSOT. (2021).** Sistema de Monitoreo Atmosférico del Estado de Sonora. Gobierno del Estado de Sonora.

**Stein, A. F., Draxler, R. R., Rolph, G. D., Stunder, B. J. B., Cohen, M. D., & Ngan, F. (2015).** NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(12), 2059–2077.  
<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>

**Suárez Tamayo, S., & Molina Esquivel, E. (2014).** El desarrollo industrial y su impacto en el medio ambiente. *Revista cubana de higiene y epidemiología*, 52(3), 357-363.

**TROPOMI. (2018).** Algorithm Theoretical Basis Document: NO<sub>2</sub> Retrieval. Copernicus Sentinel-5P Mission.

**U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2021).** National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) for NO<sub>2</sub>. <https://www.epa.gov/no2-pollution>

**Veefkind, J. P., et al. (2012).** TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of atmospheric composition. *Remote Sensing of Environment*, 120, 70–83.

**Velasco, E., Segovia, E., González, R., & Ramos, R. (2018).** Cómo construir una gestión de la calidad del aire eficiente, justa y transparente.

**Wang, L., Zhang, H., Mao, L., Li, S., & Wu, H. (2020).** Assessing Spatiotemporal Characteristics of Urban PM<sub>2.5</sub> Using Fractal Dimensions and Wavelet Analysis. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020.

**Wu, H., Ye, L. P., Shi, W. Z., & Clarke, K. C. (2014).** Assessing the effects of land use spatial structure on urban heat islands using HJ-1B remote sensing imagery in Wuhan, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 32, 67-78.

**Wu, J., Yao, F., Li, W., & Si, M. (2016).** VIIRS-based remote sensing estimation of ground-level PM<sub>2.5</sub> concentrations in Beijing–Tianjin–Hebei: A spatiotemporal statistical model. *Remote Sensing of Environment*, 184, 316-328.

**Zhang, G., Rui, X., & Fan, Y. (2018).** Critical review of methods to estimate PM<sub>2.5</sub> concentrations within specified research region. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(9), 368.