

# MODELAMIENTO DE LA DISPERSIÓN DE MATERIAL PARTICULADO CONSIDERANDO EL MODELO DIGITAL DE SUPERFICIE DE ALTA RESOLUCIÓN A PARTIR DE DATOS LIDAR PARA IDENTIFICAR ZONAS URBANAS CONTAMINADAS DE SANTA CRUZ DE LA SIERRA

## MODELING OF THE DISPERSION OF PARTICULATE MATTER CONSIDERING THE HIGH RESOLUTION DIGITAL SURFACE MODEL BASED ON LIDAR DATA TO IDENTIFY POLLUTED URBAN AREAS OF SANTA CRUZ DE LA SIERRA

Ing. Jhonny Jorge Romero Miranda <sup>1 \* §</sup>

Recibido: Abril 18, 2022; Aceptado: Mayo 13, 2022

### RESUMEN

La contaminación atmosférica es consecuencia directa de las emisiones al aire de los gases y material Particulado derivados de la actividad humana y de fuentes naturales" (Ministerio para la Transición Ecológica, 2017, p. 5). En el presente trabajo de investigación se plantea como objetivo general el Modelar la dispersión de material particulado utilizando un modelo digital de superficie generado a partir de datos LIDAR para identificar las zonas urbanas contaminadas de Santa Cruz de la Sierra, para lograr llegar al objetivo se plantearon objetivos intermedios que permitieron la conclusión de la investigación, primeramente, se realizó un diagnóstico ambiental de la zona de estudio en el cual se describen las principales características de la zona de estudio, en un segundo objetivo se generaron modelos digitales de superficie y modelos digitales del terreno empleando datos de un vuelo Aero transportado LIDAR, en el tercer objetivo a través de la revisión bibliográfica se seleccionó un modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos que mejor se adapte a la escala de trabajo local y a los datos empleados es así que se empleó el modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos AERMOD, se recopiló información de datos meteorológicos, proporcionado por el SENAMHI, como ser: temperatura, precipitación, velocidad del viento, dirección, así también se solicitó datos al Gobierno Autónomo Municipal de Santa Cruz de la Sierra sobre el contaminante PM 10 de su red de monitoreo de calidad del aire, todas estas variables intervinieron en el modelado, y el resultado fue una mancha de datos continuos en formato RASTER en la que se muestran las concentraciones de contaminación de PM 10, a través de un procesamiento espacial se identificó la zona con mayor exposición al contaminante siendo la zona Unidad Vecinal C II, se validó los resultados con la consulta a expertos de la unidad de monitoreo y control ambiental del Gobierno Autónomo Municipal de Santa Cruz de la Sierra.

Los resultados a los cuales se llegó, demuestran que la importancia de emplear modelos digitales de superficie para modelar el relieve terrestre mejora los modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos.

**Palabras claves:** Contaminación atmosférica, modelo de dispersión, material particulado, modelo digital de superficie, LIDAR.

### ABSTRACT

Air pollution is a direct consequence of emissions into the air of gases and particulate matter derived from human activity and natural sources" (Ministry for the Ecological Transition, 2017, p. 5). The general objective of this research work is to model the dispersion of particulate material using a digital surface model generated from LIDAR data to identify the urban areas with the greatest pollution in the city of Santa Cruz de la Sierra, to achieve To reach the objective, intermediate objectives were raised that allowed the conclusion of the research, firstly, an environmental diagnosis of the study area was carried out in which the main characteristics of the study area are described, in a second objective digital models of surface and digital terrain models using data from an Aero transported LIDAR flight, in the third objective, through the bibliographic review, a dispersion model of atmospheric pollutants was selected that best

adapts to the local work scale and the data used is thus that the AERMOD air pollutant dispersion model was used , information was collected from meteorological data, provided by SENAMHI, such as temperature, precipitation, wind speed, direction, and data was also requested from the Autonomous Municipal Government of Santa Cruz de la Sierra on the pollutant PM 10 from its monitoring network of air quality, all these variables intervened in the modeling, and the result was a patch of continuous data in RASTER format in which the concentrations of PM 10 contamination are shown, through spatial processing the area with the highest exposure to the pollutant being the area Neighborhood Unit C II, the results were validated with the consultation of experts from the environmental monitoring and control unit of the Autonomous Municipal Government of Santa Cruz de la Sierra.

The results that were reached show that the importance of using digital surface models to model the land relief improves the dispersion models of atmospheric pollutants.

**Keywords:** Air pollution, dispersion model, particulate matter, digital surface model, LIDAR.

---

**Citación:** Romero Miranda Jhonny J. **MODELAMIENTO DE LA DISPERSIÓN DE MATERIAL PARTICULADO CONSIDERANDO EL MODELO DIGITAL DE SUPERFICIE DE ALTA RESOLUCIÓN A PARTIR DE DATOS LIDAR PARA IDENTIFICAR ZONAS URBANAS CONTAMINADAS DE SANTA CRUZ DE LA SIERRA.** Revista Científica EMINENTE 2022, 6-1: 33-44.

---

<sup>1</sup> Ingeniero Geógrafo – Unidad de Investigación Ciencia y Tecnología La Paz – Unidad Académica La Paz - Escuela Militar de Ingeniería

\* Corresponde al Autor (correo electrónico: jhonnyjrm@gmail.com)

<sup>§</sup> Dirección de contacto Investigador: Unidad Académica La Paz- Unidad de Investigación, Ciencia y Tecnología – Campus Alto Irapavi - Telf.: (+591) 71542872 -2799505 (349) – La Paz – Bolivia.

## INTRODUCCIÓN

“La contaminación atmosférica es consecuencia directa de las emisiones al aire de los gases y material Particulado derivados de la actividad humana (social y económica) y de fuentes naturales” (Ministerio para la Transición Ecológica, 2017, p. 5). Los contaminantes que afectan la calidad del aire más preponderantes son: COV (Compuestos Orgánicos Volátiles), NO<sub>2</sub> (dióxido de nitrógeno), SO<sub>2</sub> (dióxido de azufre), NOx (óxidos de nitrógeno), O<sub>3</sub> (ozono), material Particulado y el CO (Monóxido de carbono).

“La mayoría de los contaminantes se difunden en la parte baja de la troposfera, donde interactúan entre sí y con los demás compuestos presentes, antes de su deposición. Otros ascienden a alturas considerables y son transportados hasta lugares muy alejados del foco emisor. Algunos logran traspasar la tropopausa e introducirse en la estratosfera” (CEUPE, 2019, p. 1).

Los contaminantes atmosféricos en su dispersión son afectados por factores meteorológicos (humedad, lluvia, temperatura, radiación solar, el movimiento del viento), el viento es el movimiento del aire que tiene gran influencia en la dispersión de los contaminantes, que es afectado es decir es retardado por la fricción del suelo (valles, montañas, lagos, áreas de cultivos, áreas boscosas, y las edificaciones), la fricción es preponderantemente mayor en el área urbana respecto al área rural.

El avance de la tecnología permite la recolección de grandes volúmenes de datos en corto tiempo. La tecnología LIDAR aerotransportada, por ejemplo, permite obtener el Modelamiento Digital de la Superficie y el Modelamiento Digital del Terreno a través de una nube de puntos con millones de datos con sus coordenadas X, Y y Z.

## METODOLOGÍA

Teniendo en cuenta los diferentes enfoques que existen en los desarrollos de investigaciones, para la presente investigación el Paradigma elegido es Positivista, porque con la investigación se pretende: Buscar la explicación causal de cómo afectan las edificaciones representadas a través de un modelo digital de alta resolución en la modelación de la dispersión de partículas contaminantes en el área urbana de Santa Cruz de la Sierra.

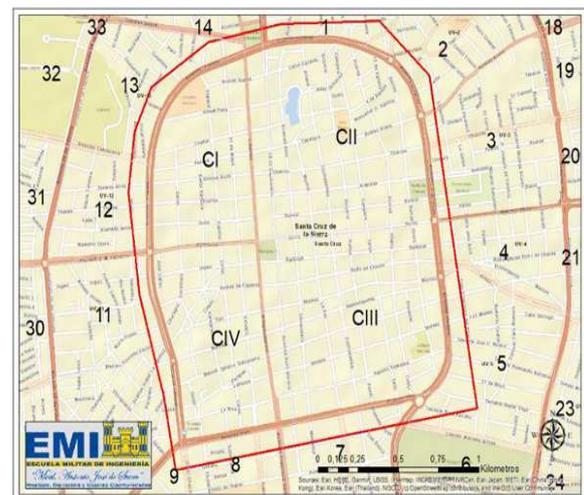
El enfoque de investigación es cuantitativo, la información a ser analizada corresponde a datos de meteorología como la velocidad, dirección del viento,

la cantidad de material Particulado en el ambiente y los datos LIDAR que se mide en la cantidad de puntos por metro cuadrado para la generación del modelo digital de superficie de alta resolución, conforman la estructura urbana.

El tipo de investigación por la profundidad al realizar el estado del arte para encontrar, analizar y seleccionar el modelo que mejor se ajuste a la dispersión de partículas contaminantes será de tipo descriptivo; con la modelación de la dispersión de partículas contaminantes el diseño es No experimental; no es posible experimentar con la manipulación de las variables, se observaran los fenómenos tal cual se dan en el contexto natural para después analizarlos.

En la presente investigación el universo es toda el área urbanizable edificada del municipio de Santa Cruz de la Sierra, pero, por la gran cantidad de datos empleados en los modelos se restringió a un segmento del área urbana como muestra, siendo éste el casco viejo o también denominado primer anillo.

Fig. 1. Mapa de Ubicación Primer Anillo



Fuente: Elaboración propia, 2021

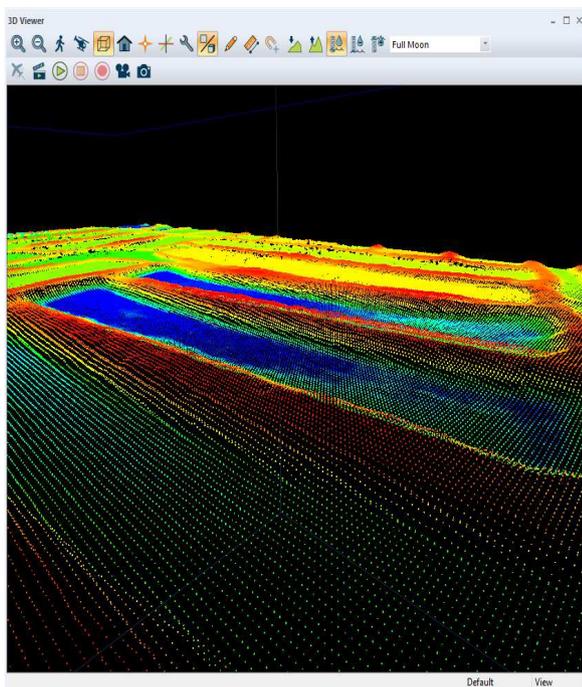
La hipótesis planteada es: Los modelos digitales de superficie de alta resolución permiten mejorar los resultados de los modelos de dispersión de PM 10 para identificar zonas de mayor exposición a partículas contaminantes.

El desarrollo del primer objetivo es Realizar un diagnóstico ambiental de la zona de estudio; El diagnóstico de la zona de estudio se realizó en base a la recopilación bibliográfica disponible la cual contemplo la descripción de: La ubicación geográfica, la población, las áreas protegidas, la fisiografía, la

meteorología, la temperatura, la precipitación, los vientos, la contaminación atmosférica, el parque automotor. El describir cada uno de estos puntos permitió conocer la realidad del municipio de Santa Cruz de la Sierra, contribuyendo a la identificación de los parámetros que intervinieron en la modelación y por otra parte la exclusión de parámetros que no se encuentran dentro del área de estudio.

El segundo objetivo es Generar el Modelo Digital de Superficie y Modelo Digital de Terreno a partir de los datos procesados de LIDAR; Los datos obtenidos a través de la ejecución de un vuelo LIDAR, el procesamiento de datos, clasificación de la nube de puntos en las clases suelo y construcción, permitieron la conformación de los Modelos MDT y MDS de alta resolución:

**Fig. 2.** Datos LIDAR vista Modelo Digital del Terreno



Fuente: Elaboración propia, 2021

Se generó un MDT a partir de la nube de puntos clasificada como suelo, a través de la triangulación de una red irregular de triángulos, por la alta resolución se generaron archivos de datos ampulosos y que ocupan bastante espacio en la memoria del computador, por lo que se transformó a un formato manejable simple que es el formato RÁSTER con una resolución espacial de 0.5 metros de tamaño de pixel, el cual permitió su inclusión al Modelamiento con AERMOD.

**Fig. 3.** Datos LIDAR vista Modelo Digital de Superficie



Fuente: Elaboración propia, 2021

El MDS se generó gracias a la clasificación de la nube de punto LIDAR, clase construcciones al igual que en la generación del MDT primeramente se construyó la red irregular de triángulos, se transformó a formato RASTER, a diferencia del MDT anterior modelo este contempla las alturas de las edificaciones con una resolución espacial de 0.5 metros de tamaño de pixel, permitiendo contemplar en la modelación del AERMOD.

En la comparación tanto el MDT como el MDS con el modelo público que proporciona el AERMOD el que mejor se adecua es el SRTM de 30 metros de tamaño de pixel, pero este no está disponible para Bolivia, el que sí está disponible para la región es de 90 metros de tamaño de pixel, que tiene mucha diferencia al generado en la investigación con 0.5 metros

Como tercer objetivo es Selección del modelo de dispersión de contaminantes atmosférico; En la recopilación de información bibliográfica, se identificaron varios modelos de dispersión atmosférico, siendo elegido el Modelo AERMOD propuesto por la EPA de Estados Unidos, este modelo es uno de los más usados en la región y en algunos países está contemplado en su normativa, como es el caso de Chile, es así que este modelo permite integrar todas la variables topográficas de MDT, MDS de alta resolución, datos de fuentes de contaminantes puntuales, lineales y de área, datos meteorológicos de precipitación, temperatura, dirección y velocidad del viento, permitiendo integrar todas la variables en el Modelo AERMOD de dispersión del aire de pluma Gaussiana, el programa que se utilizo es el de la versión AERMOD VIEW 8.9.0.

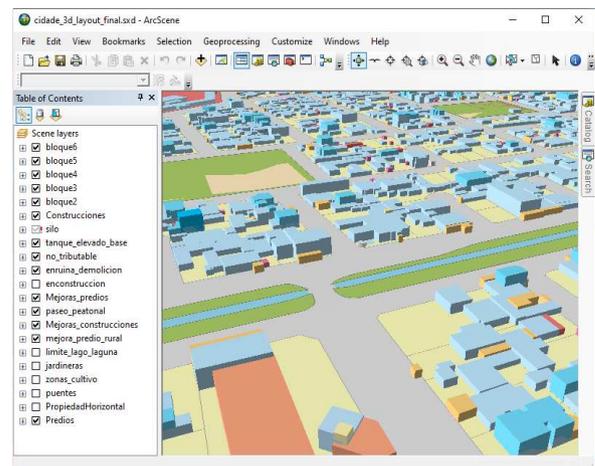
**Fig. 4.** Estación Centro de Educación Ambiental Municipal

Fuente: Elaboración propia, 2021

La recopilación de datos fue a través de instituciones de carácter nacional como el SENAMHI e instituciones locales como la institución edil de Santa Cruz; El Gobierno Autónomo Municipal de Santa Cruz de la Sierra a través de la dirección de Gestión y Control Ambiental previa presentación de una solicitud de datos para acceder a la Red de Monitoreo de Calidad del Aire, se obtuvo datos de 8 estaciones de las cuales solo 3 miden el contaminante atmosférico de Material Particulado, esta información fue sistematizada para su utilización en el Modelamiento con AERMOD. Así mismo a través de una nota formal ante el SENAMHI se adquirió datos de la estación meteorológica El Trompillo la cual está a menos de 3 kilómetros del área de estudio, también se procedió a sistematizar la información proporcionada y su empleo en el Modelo AERMOD.

El Cuarto objetivo es Modelar la dispersión de material Particulado utilizando un modelo digital de superficie generado a partir de datos LIDAR para identificar las zonas urbanas de mayor contaminación en Santa Cruz; En el desarrollo del modelamiento con AERMOD se siguió rigurosamente el procediendo en la inclusión de las variables de estudio, el modelo tiene validadores estrictos por cada etapa, si no se cumple con los requisitos no permite continuar siendo un modelo riguroso, los módulos empleados son los siguientes:

El módulo del AERMET permitió ingresar las variables meteorológicas de la estación El Trompillo generándose un modelo meteorológico del año 2019 al año 2020, así como la rosa de vientos y la clasificación de los sectores como Urbano.

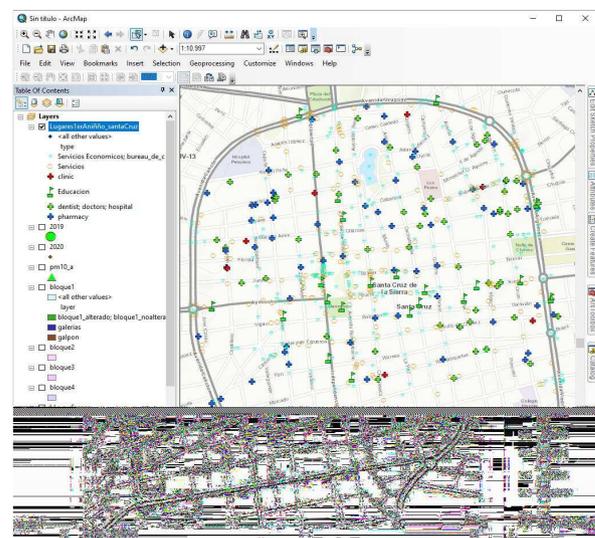
**Fig. 5.** Visualización de construcciones 3D- ArcScene

Fuente: Elaboración propia, 2021

El módulo de edificaciones permitió la inclusión de bloques constructivos diferenciados por niveles homogéneo siendo 10 grupos de bloques, siendo el bloque 1 el que tiene el número mayor de construcciones con un total de 14819 a diferencia del bloque 10 que solo tiene 2 construcciones

El Módulo de Fuentes de contaminantes permitió la adición de los datos de contaminantes puntuales y lineales dentro del área de estudio.

El modelo AERMOD contempla el análisis de zonas de influencia de las construcciones con relación a los datos de dirección del viento y la velocidad con respecto a la ubicación y dirección de la construcción.

**Fig. 6.** Visualización de los Receptores agrupados

Fuente: Elaboración propia, 2021

El Módulo Grilla de receptores permitió la creación de la grilla que abarco toda el área de estudio que es el primer anillo de la ciudad de Santa Cruz de la Sierra.

Se identificaron los receptores potenciales en un número de 603 que se clasificaron en cinco grupos afines a su actividad como ser: Salud, educación, mercados, servicios de salud, actividad económica permitiendo la inclusión al modelado.

El módulo AERMAP permitió la adición del MDT y MDS generados a partir de datos LIDAR los cuales con una resolución de 0.5 metros se convierten en insumos de alta resolución que se incluyó en modelado.

En la ejecución del modelo AERMOD el resultado fue una superficie continua del modelamiento de la dispersión de contaminante de PM 10 para todo el

primer anillo identificándose visualmente los lugares con mayor contaminación que abarcan las cuatro zonas o unidades vecinales.

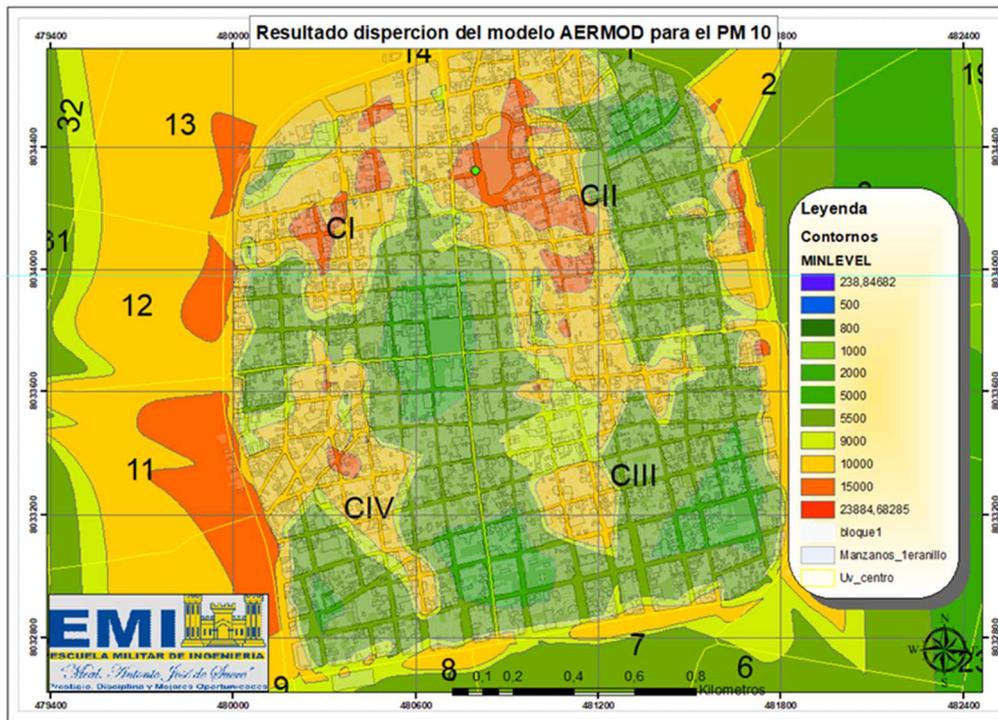
A través de la técnica de estadísticos zonales se obtuvieron datos estadísticos de Máximos, mínimos y la media aritmética que permitió identificar que la zona UV CII es la que cuenta con mayor contaminación con relación a las otras tres zonas.

Como el último objetivo se tiene Validar los resultados con la autoridad ambiental del GAMSC; Modo de validación, Cuestionario de validación para el juicio de experto; Se validó los resultados con la autoridad ambiental competente del GAMSCS, a través de un panel de expertos, además de un especialista del nivel estatal, todos coincidieron en la aceptación del procedimiento y resultados obtenidos.

### RESULTADOS

El resultado final del modelamiento con AERMOD de la dispersión del contaminante atmosférico PM 10, en el casco viejo de la ciudad de Santa Cruz de la Sierra, denominado primer anillo, empleando modelos digitales de alta resolución de 0.5 metros en resolución espacial, también la intervención de datos de la estación meteorología El Trompillo, como principales la velocidad del viento, dirección del viento, temperatura, además se incluyó la complejidad del uso del suelo que en su totalidad es Urbano, se dibujaron las construcciones agrupándose en diez grupos homogéneos, adicionalmente el modelo AERMOD permite contemplar las zonas de influencia de la construcción, también permite la inclusión del perfil de la construcción, se incluyó la grilla de receptores, con un total de 603 receptores agrupados en cinco grupos, todo lo anteriormente explicado se aprecia en la figura precedente.

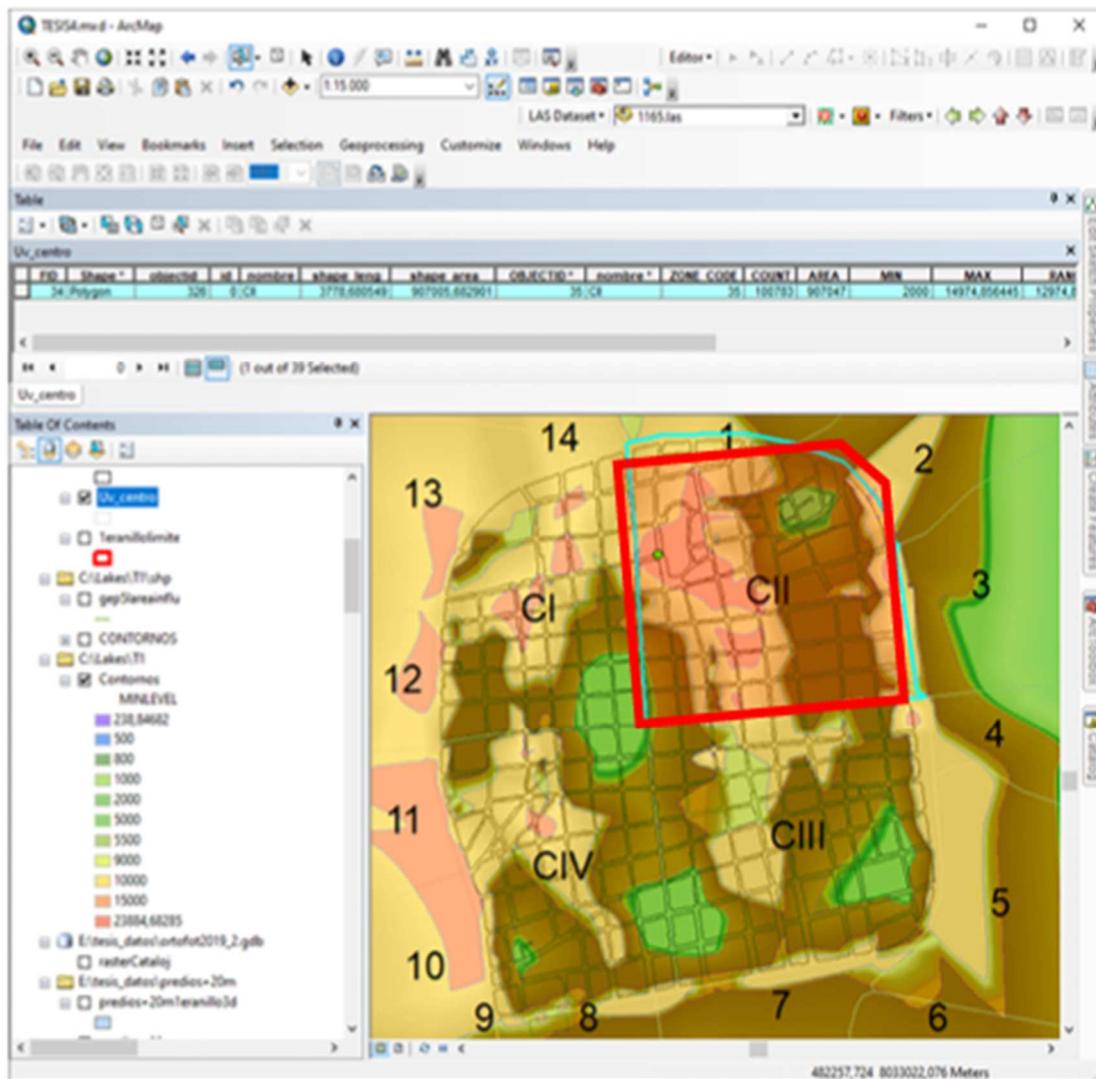
Fig. 7. Resultado final – AERMOD



Fuente: Elaboración propia, 2021

Una vez obtenido el modelado de contaminación atmosférica PM 10, para el centro de la ciudad de Santa Cruz de la Sierra, se procedió a realizar la identificación de las zonas con mayor contaminación, como se mencionó anteriormente el primer anillo está compuesto por cuatro unidades vecinales, denominadas UV CI, UV CII, UV CIII y UV CIV. En este punto de la investigación con el resultado del modelamiento se realizó un cruce espacial entre el dato resultante del modelamiento y la cobertura de unidad vecinal, para lo cual se utilizó la aplicación ModelBuilder con la herramienta espacial de estadísticos zonales, para determinar por cada unidad vecinal los datos estadísticos de: la medida media de concentración, el máximo y mínimo del contaminante PM10.

Fig. 8. Estadística Zonal - AERMOD

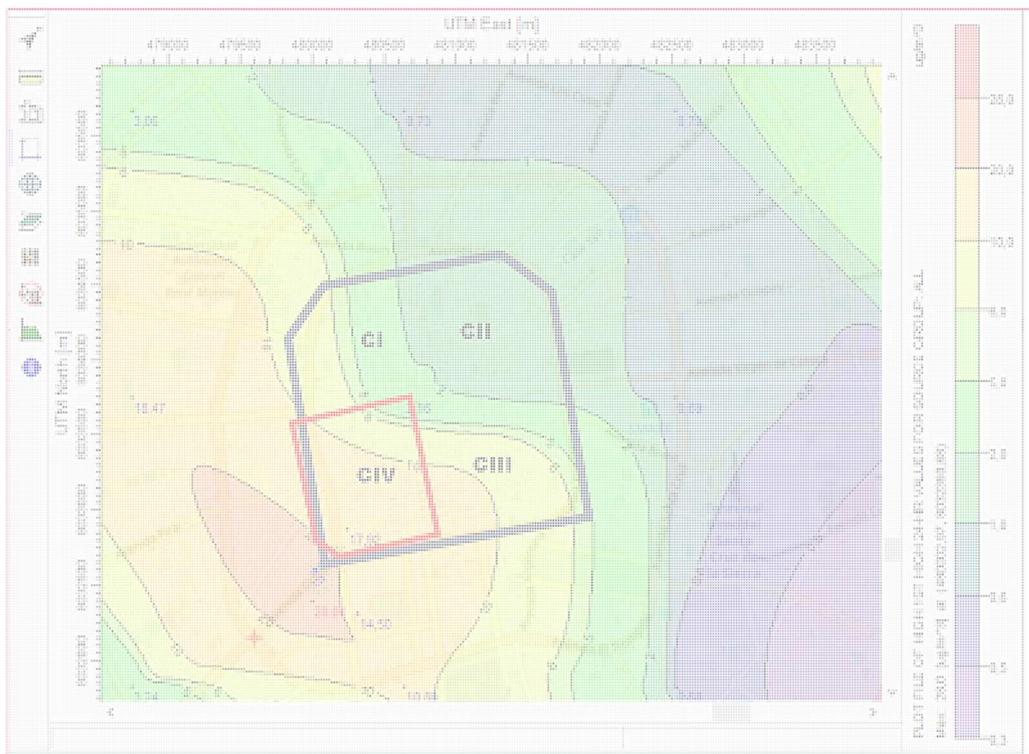


Fuente: Elaboración propia, 2021

En el resultado gráficamente podemos apreciar que la zona o unidad vecinal CIII, es la que menos concentración de contaminante de PM-10 tiene, la unidad vecinal o zona que mayor concentración del contaminante tiene es la CII.

La demostración de la hipótesis planteada en el presente trabajo de investigación, “Los modelos digitales de superficie de alta resolución mejoran los resultados de los modelos de dispersión para identificar zonas de mayor exposición a partículas contaminantes”, se procedió a realizar el mismo procedimiento explicado en el presente capítulo, pero con la diferencia de omitir la intervención o la No utilización del modelo digital de superficie de alta resolución, empero si utilizando el modelo de acceso público SRTM3, proporcionado por el AERMOD dato de uso público, de una resolución de 90 metros.

Fig. 9. Resultado 1 – AERMOD



Fuente: Elaboración propia, 2021

**Análisis**

El resultado de la figura 3 fue realizado tomando en cuenta todas las variables, como ser: meteorología, receptores, grilla, etc. se puede apreciar que la zona con mayor contaminación sería la unidad vecinal C IV, siendo un resultado diametralmente opuesto al obtenido en el apartado anterior. A continuación, se presenta el análisis considerando varios aspectos y comparando con el modelo obtenido en la figura 2.

Tabla. 1. Criterios para ambos modelos

Aspectos	Modelo Digital de superficie de Alta Resolución	Modelo SRTM
<b>Clasificación de zonal donde la concentración de contaminante es mayor</b>	Zona UV II Zona UV C I Zona UV C IV Zona UV C III	Zona UV IV Zona UV C III Zona UV C II Zona UV C I
<b>Modelo Digital de superficie</b>	Resolución de 0.5 metros	Resolución de 90 metros
<b>Contempla las edificaciones, construcciones</b>	Si	No
<b>Datos meteorológicos</b> Temperatura Precipitación Velocidad del viento Dirección del viento	Ambos consideran los mismos datos	
<b>Datos de contaminación de material particulado PM 10</b>	Ambos consideran los mismos datos	
<b>Grilla de receptores</b>	Ambos consideran los mismos datos	
<b>imágenes</b>	Figura 2	Figura 3

Fuente: Elaboración propia, 2021

Considerando que ambos modelos emplean los mismos datos de meteorología, datos de contaminación de material particulado PM 10, y los receptores son los mismos, el modelo digital de superficie de alta resolución contempla las edificaciones y construcciones a diferencia del otro modelo que no lo contempla y el parámetro fundamental el modelo digital de superficie representa una diferencia de 89.5 metros, de esta forma se comprueba la hipótesis por analogía, observación y comparación de resultados.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Para una mejor comprensión, primeramente, se describirán los objetivos del presente trabajo de investigación y a continuación la conclusión que le corresponde.

- Realizar un diagnóstico ambiental de la zona de estudio.

El diagnóstico de la zona de estudio se realizó en base a la recopilación bibliográfica disponible, se determinó que: El municipio de Santa Cruz de la Sierra presenta impactos ambientales que afectan a la fauna y flora, provocados por la pérdida vegetal boscosa por la expansión urbanística, la actividad agrícola y ganadera; así mismo la zona de estudio presenta problemas ambientales con el tráfico lento en las principales avenidas y emisiones atmosféricas elevadas.

- Generar un Modelo Digital de Superficie y Modelo Digital de Terreno a partir de los datos procesados de LIDAR.

Se generó un MDT y MDS representado por una matriz numérica de 5.000 filas por 5.000 columnas, con una resolución espacial de 0.5 metros, las alturas varían desde 398 metros hasta 495 metros sobre el nivel medio del mar.

- Seleccionar un modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos.

En la recopilación de información bibliográfica, se identificaron varios modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos, siendo elegido el Modelo AERMOD propuesto por la EPA de Estados Unidos, para su selección se cumplieron los factores de: resolución espacial y temporal, características del terreno, la meteorología del lugar, es así que este modelo permitió integrar todas las variables del estudio.

- Validar de los resultados con la autoridad ambiental competente del Gobierno Autónomo Municipal de Santa Cruz de la Sierra.

Se validó los resultados con la autoridad ambiental competente del GAMSCS, a través de un panel de

expertos, todos los expertos coincidieron en la aceptación del procedimiento y resultados obtenidos.

- Modelar la dispersión de material Particulado utilizando un modelo digital de superficie generado a partir de datos LIDAR para identificar las zonas urbanas de mayor contaminación en Santa Cruz.

El modelamiento con AERMOD al ser un modelo de dispersión de contaminantes riguroso permitió la identificación de la zona con mayor contaminación siendo la zona denominada CII, comparando con el modelo generado con un MDS de resolución de 90 metros el resultado cambia diametralmente opuesto confirmando que los MDS de alta resolución mejoran los resultados obtenidos en la investigación.

## RECOMENDACIONES

En la generación del modelo hidrológico se debe considerar datos verticales de meteorología obtenidos por globos meteorológicos que tienen que ser capturados y posterior a su sistematización se puede ingresar al modelo para identificar las posibles variaciones a los datos obtenidos.

El empleo de modelos de dispersión en el monitoreo de la calidad del aire debe ser una política municipal.

Se debe de incluir en la normativa nacional el empleo de modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos.

Los datos de las estaciones de monitoreo del GAMSCS deben ser de libre acceso vía web, esto facilitara el desarrollo de estudios regionales

## CONFLICTO DE INTERES

El autor declara que no tiene conflictos de interés con la presente investigación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. (20 de Julio de 2021). epa.gov. Obtenido de <https://espanol.epa.gov/espanol/conceptos-basicos-sobre-el-material-particulado-pm-por-sus-siglas-en-ingles>.

- [2] Almenar Muñoz, M. (2017). LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA DERIVADA DE LAS AGLOMERACIONES URBANAS Y OTRAS CAUSAS: EL INCUMPLIMIENTO CONSTANTE DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA. *Actualidad Jurídica Ambiental*, 67.
- [3] ArcGIS for Desktop - ESRI. (10 de Junio de 2021). ¿Qué es ModelBuilder? Obtenido de <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/analyze/modelbuilder/what-is-modelbuilder.htm>
- [4] ASPRS. (30 de agosto de 2021). Common Lidar Data Exchange Format LAS Industry Initiative. Obtenido de [http://www.asprs.org/a/society/committees/lidar/lidar\\_format.html](http://www.asprs.org/a/society/committees/lidar/lidar_format.html)
- [5] Baquero, I. O. (2016). ESTUDIO DE LA VARIABLE ALTIMETRICA (Z) SOBRE UN MODELO DIGITAL DE ELEVACION POR MEDIO DE TECNOLOGIA LIDAR TERRESTRE. Bogotá: UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS.
- [6] Bosque Sendra, J. (2000). *Sistemas de Información Geográfica*. Madrid: Ediciones Rialp.
- [7] Bustos, C. (2004). APLICACIÓN DE MODELOS DE DISPERSIÓN ATMOSFÉRICA EN LA EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL: ANÁLISIS DEL PROCESO. Santiago: UNIVERSIDAD DE CHILE.
- [8] Bustos, I. (Mayo 2014). Una herramienta eficaz para evaluar el impacto. *News Better* N°53, 1-7.
- [9] Camaño, J. L. (2004). Sistema Integrado para la modelización y el análisis de la calidad del aire en modo operacional. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- [10] Cañada, R., & Moreno, A. (2015). Monitoreo con SIG de la calidad de la atmósfera urbana para la gobernanza local: el caso de Madrid. MEMORIA XIV CONFERENCIA IBEROAMERICANA DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARTE II (pp. 1-21). Madrid: REVISTA CIENCIAS ESPACIALES.
- [11] Centro de Escritura Javeriano. (2010). *Normas APA Sexta Edición*. México: Centro de Escritura Javeriano.
- [12] CEUPE. (2019, 6 5). BLOG CEUPE. Retrieved from <https://www.ceupe.com/>.
- [13] Corredor, J. D. (2018). Implementación De Datos Lidar Para La Detección De Cambios En El Proceso De Actualización Catastral Caso De Estudio Zona Piloto Municipio De Chía. Colombia: Universidad Distrital Francisco José De Caldas.
- [14] Crespo Mozo, M., & Manso Alconada, M. (2014). CONTROL DE CALIDAD DEL VUELO LIDAR UTILIZADO PARA LA MODELIZACIÓN 3D DE LAS FALLAS DE ALHAMA (MURCIA) Y CARBONERAS (ALMERÍA). Madrid, España: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID.
- [15] Diccionario Definición ABC. (2021). Obtenido de <https://www.definicionabc.com/>
- [16] Escuela Militar de Ingeniería. (2012). INSTRUCCIONES PARA LA PRESENTACIÓN DE PROYECTO DE GRADO TESIS DE MAESTRÍA, DOCTORADO E INVESTIGACIÓN Y PUBLICACIÓN DE POSTDOCTORADO. La Paz: EMI.
- [17] Felicísimo, A. (1994). *Modelos Digitales del Terreno Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales*. Oviedo, España: amfeli@unex.es.
- [18] Felicísimo, A. M. (15 de Mayo de 2021). Conceptos básicos, modelos y simulación/. Obtenido de Capitulo 1: <http://www.etsimo.uniovi.es/~feli/>
- [19] Fernández García, E. (2012). EJEMPLOS DE APLICACIÓN DE MODEL BUILDER DE ARC GIS 10 EN LA GESTIÓN FORESTAL. Oviedo, España: UNIVERSIDAD DE OVIEDO.
- [20] Flores, E. E. (2019, abril 4). La construcción se estanca y prevén que venta de casas se ‘congele’ por tres años. *El Deber*, p. 1.
- [21] GACETA. (1992). *Ley de Medio Ambiente*. La Paz - Bolivia: Editorial S.R.L.
- [22] GACETA. (2009). CONSTITUCIÓN POLÍTICA DEL ESTADO. LA PAZ: LA GACETA.
- [23] Gallardo, L. (2004). TRAZAS ATMOSFÉRICAS Y SU MODELACIÓN. Santiago: Universidad de Chile.

- [24] Gobierno Autónomo Municipal de Santa Cruz de la Sierra. (15 de agosto de 2021). Gobierno Autónomo Municipal de Santa Cruz de la Sierra. Obtenido de <https://gmsantacruz.gob.bo>
- [25] González Cáceres, S. (2016). Revisión de protocolos de análisis químico de material particulado recolectado en filtros. Uniandes.
- [26] Goovaerts, P. (1997). Geostatistics for natural resources evaluation. New York: Oxford University Press.
- [27] Granier, P. (2003). "The Changing Atmosphere: An Integration and Synthesis of a Decade of Tropospheric Chemistry Research.". Springer-Verlag.
- [28] Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. (2010). METODOLOGÍA de la investigación. México: McGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES.
- [29] Hohle, j., & Hohle, M. (2009). Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 398-406.
- [30] Instituto Nacional de Estadística. (15 de agosto de 2021). Instituto Nacional de Estadística. Obtenido de <https://www.ine.gob.bo/>
- [31] JICA. (2017). Proyecto del Plan Maestro para la Mejora del Transporte del Área Metropolitana de Santa Cruz. Santa Cruz de la Sierra: JICA.
- [32] Lorenzo, A., Iseburg, M., Arbelo, M., & Alonso-Benito, A. (2012). Comparación de modelos digitales del terreno obtenidos mediante LiDAR y técnicas fotogramétricas en una zona forestal de la isla de Tenerife. XV Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica, Madrid.
- [33] Loro Aguayo, M. (2015). MODELO PARA LA INTEGRACIÓN DEL TRAZADO DE INFRAESTRUCTURAS LINEALES EN EL PAISAJE Y EL MEDIO AMBIENTE BASADO EN SIG. Madrid, España: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID.
- [34] Lujan, M., & Vásquez, R. (2017). Manual para la elaboración de inventarios de emisiones en Bolivia – Segunda Edición. La Paz: Proyecto Aire Limpio.
- [35] Manso, M., & Crespo Moso, M. (2014). CONTROL DE CALIDAD DEL VUELO LiDAR UTILIZADO PARA LA MODELIZACIÓN 3D DE LAS FALLAS DE ALHAMA (MURCIA) Y CARBONERAS (ALMERÍA). Madrid: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID.
- [36] Manzur, M., Benzal, G., & González, S. (2012). MODELO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS. Séptimo Congreso de Medio Ambiente (p. 19). La Plata: Congreso de Medio Ambiente.
- [37] MENDEZ, C. (15 de NOVIEMBRE de 2020). SANTA CRUZ RESPIRA HUMO CON RÉCORDS DE ALTA CONTAMINACIÓN. PAGINA SIETE, pág. 1.
- [38] Ministerio para la Transición Ecológica. (2017). Evaluación de la calidad del aire en España. Madrid: Ministerio para la Transición Ecológica.
- [39] Modelos Ambientales, SA de CV. (2021). Modelos Ambientales. Chile: Modelos Ambientales SA. Obtenido de <https://www.modelosambientales.com/aermodview.php>
- [40] Montes de Oca, L., Rodríguez, R., Pierra, A., Cuesta, O., & Tricio, V. (2020, Junio 6). PLANES DE ACCIÓN LOCALES PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL AIRE Y ESTUDIOS DE IMPACTO AMBIENTAL APOYADOS EN MODELOS DE DISPERSIÓN ATMOSFÉRICA. Retrieved from [http://www.premioconama.org/conama9/download/files/CTs/paneles/2693\\_panel\\_APIerra.pdf](http://www.premioconama.org/conama9/download/files/CTs/paneles/2693_panel_APIerra.pdf)
- [41] Norma Boliviana NB 62011:2008 Calidad del aire - Contaminantes criterio exterior - Límites máximos permisibles. (2008).
- [42] Ormeño Villajos, S. (2004). MODELOS DIGITALES SUPERFICIALES OBTENCIÓN Y CARACTERÍSTICAS. Madrid, España: UNIVERSIDAD POLITECNICA - MADRID.
- [43] Pierra, A., Montes de Oca, L., Rodríguez, R., & Tricio, V. (2007). LANES DE ACCIÓN LOCALES PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL AIRE Y ESTUDIOS DE IMPACTO AMBIENTAL APOYADOS EN MODELOS DE DISPERSIÓN ATMOSFÉRICA. Agencia Española de Cooperación y Desarrollo, 7.
- [44] Piña, A. A. (2011). ¿CÓMO SON LAS PARTÍCULAS ATMOSFÉRICAS

ANTROPOGÉNICAS Y CUÁL ES SU RELACIÓN CON LOS DIVERSOS TIPOS DE FUENTES CONTAMINANTES? San Luis Potosí: Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

- [45] RED MONICA. (2015). COMPLEMENTACIÓN DEL INFORME NACIONAL DE CALIDAD DEL AIRE DE BOLIVIA. LA PAZ: Red de Monitoreo de la Calidad del Aire.
- [46] Red MoniCA. (2015). INFORME NACIONAL DE CALIDAD DEL AIRE DE BOLIVIA - 2015. La Paz: Swisscontact.
- [47] Red MoniCA. (2016). COMPLEMENTACIÓN DEL: "INFORME NACIONAL DE CALIDAD DEL AIRE DE BOLIVIA, GESTIONES 2014 - 2015". LA PAZ: Swisscontact.
- [48] Reglamento en materia de contaminación atmosférica de la Ley de Medio Ambiente Numero1333. (1995).
- [49] Romero, M., Zaragoza, A., & Martín, G. (2005). Uso de Modelos Digitales en la Planificación Urbana. Universidad del Bio - Bio 2005, 66-71.
- [50] ROSALES, A. (9 de NOVIEMBRE de 2020). Santa Cruz sufre de la mayor contaminación de aire en lo que va del año. EL DEBER, pág. 1.
- [51] Salamanca, J., & Pérez, J. (2008). LIDAR, una tecnología de última generación, para planeación y desarrollo urbano. 1, 67-76.
- [52] Secretaría de Energía. (2012). Prospectiva de Petrolíferos 2012-2026. México: Dirección General de Planeación e Información Energéticas.
- [53] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2013). Guía metodológica para la estimación de emisiones de fuentes fijas. México D.F.: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.
- [54] Tomé López, C. (2021, Abril 1). Leyes, teorías y modelos (I): La definición de ley física. Retrieved from <https://culturacientifica.com/2013/02/05/leyes-teorias-y-modelos-i-la-definicion-de-ley-fisica/>
- [55] TORREZ JEREZ, A. (2008). APLICACIÓN PRÁCTICA DEL MODELO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS. Master en Ingeniería y Gestión Medioambiental.
- [56] Universidad Autónoma Chapingo. (2015). Avances y Perspectivas de Geomática con Aplicaciones Ambientales, Agrícolas y Urbanas. D.R. © Editorial del Colegio de Postgraduados, 27.
- [57] Universidad Pablo de Olavide. (2020). Dispersión de contaminantes atmosféricos: Modelo gaussiano de la columna de humo. Sevilla: Universidad Pablo de Olavide.
- [58] Vargas Gonzales, J. M. (2020). Evaluación espacial y temporal de la calidad del aire en Colombia a partir de los datos del servicio de monitoreo atmosférico de Copernicus (CAM5) y monitoreos en superficie. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- [59] Vidal, O., & Pérez, A. (2018). ESTIMACIÓN DE LA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS EMITIDOS POR UNA INDUSTRIA PAPELERA MEDIANTE EL MODELO AERMOD. INGENIERÍA - UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS, 31-47.
- [60] Wise, S. (2000). Assessing the quality for hydrological applications of digital elevation models derived from contours. Hydrological Processes, 1909-1929.



**Ing. Jhonny Jorge Romero Miranda.**

Ingeniero Geografo de la Escuela Militar de Ingeniería (2004) – La Paz – Bolivia.

Encargado de Investigación Institucional –UICYT

UALP - EMI – 2022.

Especialista en SIG, Especialista en Catastro, Especialista en LIDAR, Especialista ISO 9001:2015, Consultor nacional e internacional.