



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

La Universidad Católica de Loja

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Estudio exploratorio de la calidad ambiental en entornos urbanos, caso de estudio de la ciudad de Nueva Loja

Trabajo de integración curricular previo a la obtención del título de:

INGENIERO AMBIENTAL

Autor: Ruiz Aguilar, Guillermo Daniel

Director: González Coronel, Ivonne María

LOJA

2025



Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NC-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>

2025

Aprobación del director del Trabajo de Integración Curricular

Loja, 06 de enero de 2025

Magíster

Mercedes Villa Achupallas

Director de la carrera de Ingeniería Ambiental

Ciudad.-

De mi consideración:

Me permito comunicar que, en calidad de director del presente Trabajo de Integración Curricular denominado: Estudio exploratorio de la calidad ambiental en entornos urbanos, caso de estudio de la ciudad de Nueva Loja realizado por Guillermo Daniel Ruiz Aguilar ha sido orientado y revisado durante su ejecución, así mismo ha sido verificado a través de la herramienta de similitud académica institucional, y cuenta con un porcentaje de coincidencia aceptable. En virtud de ello, y por considerar que el mismo cumple con todos los parámetros establecidos por la Universidad, doy mi aprobación a fin de continuar con el proceso académico correspondiente.

Particular que comunico para los fines pertinentes.

Atentamente,

Director: Mgtr. Ivonne María González Coronel

Director del Trabajo de Integración Curricular

C.I.:

Correo electrónico:

Declaración de autoría y cesión de derechos

Yo, Guillermo Daniel Ruiz Aguilar, declaro y acepto en forma expresa lo siguiente:

Ser autor (a) del Trabajo de Integración Curricular denominado: Estudio exploratorio de la calidad ambiental en entornos urbanos, caso de estudio de la ciudad de Nueva Loja, de la carrera de Ingeniería Ambiental, específicamente de los contenidos comprendidos en: (se debe colocar los nombres de los capítulos elaborados en el Trabajo de Integración Curricular, siendo Mgtr. Ivonne María González Coronel, director (a) del presente trabajo; también declaro que la presente investigación no vulnera derechos de terceros ni utiliza fraudulentamente obras preexistentes. Además, ratifico que las ideas, criterios, opiniones, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad. Eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones judiciales o administrativas, en relación a la propiedad intelectual de este trabajo.

Que la presente obra, producto de mis actividades académicas y de investigación, forma parte del patrimonio de la Universidad Técnica Particular de Loja, de conformidad con el artículo 20, literal j), de la Ley Orgánica de Educación Superior; y, artículo 91 del Estatuto Orgánico de la UTPL, que establece: "Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado que se realicen a través, o con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad", en tal virtud, cedo a favor de la Universidad Técnica Particular de Loja la titularidad de los derechos patrimoniales que me corresponden en calidad de autor/a, de forma incondicional, completa, exclusiva y por todo el tiempo de su vigencia.

La Universidad Técnica Particular de Loja queda facultada para ingresar el presente trabajo al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública, en cumplimiento del artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

.....

Autor: Guillermo Daniel Ruiz Aguilar

C.I.: 11503343638

Correo electrónico: gdr Ruiz1@utpl.edu.ec

Dedicatoria

Dedico este logro a mi familia, que con su amor, apoyo y valores me ha dado la fuerza para seguir adelante. A mis amigos, quienes han sido un pilar fundamental en este camino, brindándome compañía, motivación y confianza en los momentos más desafiantes.

Pero, sobre todo, dedico este esfuerzo a mi mamá, quien con su amor incondicional, sacrificios y palabras de aliento ha sido mi mayor inspiración. Su fortaleza y dedicación me han enseñado que no hay meta imposible cuando se persigue con determinación y pasión. Este logro es tanto mío como suyo.

Agradecimiento

Agradezco a mi Familia, cuyo amor incondicional, trabajo duro y apoyo constante han sido los pilares principales para ayudarme a lograr esta meta. Gracias por confiar en mí en este viaje y por darme la oportunidad de crecer y aprender. Gracias a mi mamá, quien me brindó orientación, inspiración y aliento cuando más necesitaba ayuda. Su confianza en mí es una motivación invaluable para seguir adelante. Gracias a mis abuelos por su amor y enseñanzas, así como por ser un ejemplo de perseverancia y fortaleza. Cada palabra de aliento y cada acción solidaria se convierte en nuestra motivación para seguir adelante. Gracias a mis amigos por su compañía, apoyo y estímulo en este viaje. Gracias por estar siempre ahí para mí, riéndote, dándome consejos y recordándome que con trabajo duro y dedicación, los sueños se pueden hacer realidad. Estaré eternamente agradecido con todos los que estuvieron involucrados en este proceso de una forma u otra.

Índice de contenido

Carátula	I
Aprobación del director del Trabajo de Integración Curricular	II
Declaración de autoría y cesión de derechos.....	III
Dedicatoria	V
Agradecimiento.....	VI
Índice de contenido	VII
Resumen.....	1
Abstract	2
Introducción	3
Capítulo uno.....	6
Marco Teórico	6
1.1 Concepto de calidad ambiental urbana.....	6
1.2 Importancia de la Calidad Ambiental en Entornos Urbanos	6
1.3 Factores que influyen en la calidad ambiental urbana.....	7
1.4 Gestión Ambiental Urbana	7
1.5 Desafíos y Tendencias en la Gestión Ambiental Urbana	8
1.5.1. Planes de Uso y Gestión del Suelo (PUGS) en Nueva Loja.....	8
1.5.2 Planes de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT) de Nueva Loja	9
1.6 Teledetección aplicada al estudio/monitoreo de la calidad ambiental.....	9
1.7 Calidad ambiental en la ciudad de Nueva Loja	10
Capítulo dos	11
Materiales y métodos.....	11
2.1 Area de Estudio.....	11
2.2 Metodología para el primer objetivo: Describir variables relacionadas a la calidad ambiental de la ciudad de Nueva Loja a partir de sensores remotes, para generar información de base	11
2.2.1 Recopilación de datos.....	12

2.2.2	<i>Índice de vegetación de diferencia Normalizado (NDVI)</i>	13
2.2.3	<i>Densidad de construcción</i>	14
2.2.4	<i>Temperatura superficial terrestre</i>	14
2.2.5	<i>Normalización de las variables</i>	¡Error! Marcador no definido.
2.3	Establecer zonas prioritarias a través de la integración de variables relacionadas a la calidad ambiental, para proponer estrategias de mejora	16
2.3.1	<i>Cálculo del índice de calidad ambiental usando el método de Análisis del punto ideal</i> 16	
2.3.2	<i>Interpretación de variables</i>	18
2.3.3	<i>Identificación de áreas prioritarias</i>	18
2.3.4	<i>Comparación del ICAU con otras variables</i>	19
	Capítulo tres	20
	Resultados	20
3.1	Análisis de resultados	20
3.1.1	<i>Descripción de variables relacionadas a la calidad ambiental en la ciudad de Nueva Loja a partir de sensores remotos, para generar información base</i>	20
	3.1.1.1 Índice de vegetación NDVI.....	20
	3.1.1.2 Densidad de construcción	21
	3.1.1.3 Temperatura superficial terrestre.....	22
	3.1.1.4 Calculo del índice de calidad ambiental	23
3.1.2	<i>Comparación del Índice de Calidad Ambiental Urbana con el Patrón Espacial de contaminantes Atmosfericos</i>	24
	3.1.2.1 Clustering de variables ambientales	25
	3.1.2.2 Relación de contaminantes atmosféricos con la ciudad de Nueva Loja	28
3.2	Discusión de resultados	30
	Conclusiones	33
	Recomendaciones	35
	Referencias	36

Índice de tablas

Tabla 1 Descripción de los datos utilizados en el estudio	12
Tabla 2 Calificación de los indicadores de calidad ambiental.....	18
Tabla 3 Resumen de Indicadores Ambientales y Urbanos por Clúster	27

Índice de figuras

Figura 1 Ubicación de la ciudad de Nueva Loja.....	11
Figura 2 Diagrama metodológico de las variables de la calidad ambiental	12
Figura 3 Índice de vegetación de diferencia normalizada de la ciudad de Nueva Loja	20
Figura 4 Densidad de construcción de la ciudad de Nueva Loja del area urbana.....	21
Figura 5 Temperatura superficial terrestre de la ciudad de Nueva Loja del area urbana	23
Figura 6 Índice de calidad ambiental urbano de la ciudad de Nueva Loja del area urbana.	24
Figura 7 Estrategias de Gestión Territorial Sostenible Basadas en Clustering para Nueva Loja	26
Figura 8 Presencia de Monóxido de carbono (CO) en la ciudad de Nueva Loja comparado con el ICAU.....	29
Figura 9 Presencia de Dióxido de azufre (SO ₂) en la ciudad de Nueva Loja comparado con el ICAU	30

Resumen

El estudio exploratorio sobre la calidad ambiental en los entornos urbanos de Nueva Loja se enfoca factores clave como la densidad de vegetación, las construcciones urbanas, las temperaturas superficiales y los contaminantes atmosféricos. Estos factores se analizaron a partir de información derivada de teledetección, generando variables como el índice de vegetación (NDVI), la temperatura superficial terrestre (LST) y la densidad de construcción. Se identificaron patrones claros: las zonas periféricas presentan mayor cobertura vegetal y menores temperaturas, lo que mejora la calidad ambiental, mientras que el centro urbano muestra alta densidad de edificaciones, temperaturas elevadas y una peor calidad ambiental. Además, los contaminantes como CO y SO₂ son más altos en el centro debido al tráfico y las actividades comerciales, afectando la salud pública. Las recomendaciones incluyen conservar y expandir espacios verdes, planificar territorialmente para equilibrar áreas construidas y verdes, fomentar la construcción sostenible con materiales ecológicos y mejorar el transporte público para reducir la contaminación. Estas acciones buscan garantizar un desarrollo urbano más saludable y sostenible, beneficiando tanto al medio ambiente como a la calidad de vida de los habitantes de la ciudad.

Palabras clave: calidad ambiental, teledetección, Nueva Loja.

Abstract

The exploratory study on environmental quality in the urban areas of Nueva Loja focuses on key factors such as vegetation density, urban constructions, surface temperatures, and atmospheric pollutants. These factors were analyzed using remote sensing data, generating variables such as the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Land Surface Temperature (LST), and building density. Clear patterns were identified: peripheral areas have greater vegetation coverage and lower temperatures, improving environmental quality, while the urban center shows a high density of buildings, elevated temperatures, and poorer environmental quality. Additionally, pollutants such as CO and SO₂ are higher in the city center due to traffic and commercial activities, impacting public health. Recommendations include conserving and expanding green spaces, implementing territorial planning to balance built and green areas, promoting sustainable construction with eco-friendly materials, and improving public transportation to reduce pollution. These actions aim to ensure healthier and more sustainable urban development, benefiting both the environment and the quality of life of the city's residents.

Keywords: Environmental quality, remote sensing, Nueva Loja.

Introducción

América Latina, reconocida por su amplia variedad cultural y geográfica, sobresale como la región más urbanizada entre las economías en desarrollo a nivel global (Jordán, Rifo, & Prado, 2017). Con alrededor de dos tercios de su población habitando en ciudades con más de 20.000 residentes y cerca del 80% viviendo en áreas urbanas, el dinamismo urbano se erige como un factor crucial en la definición del porvenir de la región (Abramo, Mancilla, & Espinoza, 2016). Este patrón demográfico no solo refleja el rápido crecimiento de sus urbes, sino también la urgente necesidad de abordar de manera efectiva los desafíos asociados con el desarrollo urbano sostenible en toda la región (Jordán, Rifo, & Prado, 2017).

En Ecuador, las proyecciones indican un crecimiento poblacional hacia los 17.9 millones en 2024, 19.3 millones en 2034 y 21.1 millones en 2050. El país se enfrenta a desafíos considerables en términos de planificación urbana, gestión de recursos y mejora de la calidad de vida para sus ciudadanos (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos [INEC], 2024).

Las áreas urbanas promueven una amplia gama de actividades en diferentes campos y brindan oportunidades para intervenciones significativas. Por tanto, las áreas urbanas no solo plantean enormes desafíos, sino que también son plataformas adecuadas para lograr transformaciones positivas y sostenibles (Acioly et al., 2020).

Sin embargo, el desarrollo acelerado de las ciudades ha creado problemas como el deterioro y la disminución de los espacios verdes urbanos. Este fenómeno afecta no sólo a la biodiversidad, sino también a la calidad de vida de los habitantes, perjudicando la regulación climática, la calidad del aire y los espacios recreativos (Jiménez-López & Ruiz-Luna, 2021). En este contexto, es fundamental abordar estas cuestiones mediante enfoques innovadores, como el uso de la teledetección.

Este método ha demostrado ser una herramienta eficaz para monitorear y evaluar la calidad del entorno urbano en diversos estudios. Por ejemplo, estudios recientes han utilizado imágenes satelitales y análisis espectral para detectar cambios en la cobertura vegetal, estimar índices de vegetación y evaluar los efectos de la isla de calor urbana (Zhao et al.,

2022). Estas aplicaciones resaltan el potencial de la teledetección en el desarrollo de estrategias de protección ambiental urbana y planificación sostenible.

En este escenario, la teledetección emerge como una herramienta clave para abordar estos desafíos (Miranda, 2019). Al utilizar la información precisa y actualizada proporcionada por esta tecnología, los encargados de la toma de decisiones pueden detectar pautas de uso del suelo, evaluar la efectividad de las políticas de desarrollo urbano y prever posibles problemas ambientales y sociales (Perevochtchikova, 2013).

Según el Plan de Ordenamiento Territorial del Cantón Lago Agrio (PDOT, 2020), los asentamientos en esta zona están contextualizados dentro de un marco donde la planificación y el ordenamiento de los territorios adquieren una importancia crucial. Esto se debe a que la utilización eficaz de los recursos naturales es vital para lograr un desarrollo equilibrado y justo de las comunidades (Loor & Ramos, 2021). De acuerdo con el mismo plan (PDOT, 2020), los asentamientos de la zona enfrentan graves desafíos ambientales, como la pérdida de la cobertura vegetal, la expansión urbana y la contaminación del agua.

Según el INEC (2023), el índice verde urbano de Lago Agrio es inferior al promedio nacional, lo que indica una superficie insuficiente de espacios verdes per cápita. Esta escasez limita servicios ecosistémicos esenciales (como la regulación de la temperatura y la provisión de lugares de descanso), afectando la calidad de vida. Además, la expansión descontrolada de los límites de las ciudades también ha ejercido presión sobre los ecosistemas circundantes. El objetivo del PDOT es garantizar una buena vida, priorizar la protección del medio ambiente, lograr la armonía entre el desarrollo urbano y la preservación de la biodiversidad, así como la igualdad y la solidaridad en la región (PDOT, 2023).

Considerando lo expuesto anteriormente, el presente estudio busca evaluar la calidad ambiental en la ciudad de Nueva Loja (Lago Agrio) mediante el uso de sensores remotos y datos censales, con el fin de establecer zonas prioritarias para la mejora del entorno urbano. Para ello, se recopilarán y procesarán datos satelitales para calcular indicadores como el NDVI, la temperatura de la superficie terrestre y la densidad de edificaciones, normalizando los valores y aplicando un algoritmo de análisis de punto ideal para generar un índice de calidad ambiental. Además, se integrarán variables socioeconómicas a través de técnicas estadísticas como regresión y ANOVA, con el objetivo de identificar la relación entre la calidad ambiental y la calidad de vida de la población. Esta metodología permitirá no solo comprender el estado actual del entorno urbano, sino también detectar áreas críticas y proponer estrategias de mejora basadas en información objetiva. De esta manera, el estudio contribuirá a una planificación urbana más sostenible y a la toma de decisiones fundamentadas en evidencia.

Capítulo uno

Marco Teórico

1.1 Concepto de calidad ambiental urbana

La calidad ambiental urbana engloba las condiciones del ambiente en áreas urbanas, medida a través de elementos como la pureza del aire, la gestión adecuada de residuos, la existencia de espacios verdes y los niveles de contaminación sonora. Estos aspectos son determinantes para la salud, el bienestar de las personas y el desarrollo sostenible de las ciudades (Pugh, 2020).

La Organización Mundial de la Salud (OMS, 2021) señala que la contaminación del aire representa un riesgo significativo para la salud en contextos urbanos, al contribuir a problemas respiratorios y cardiovasculares. Al mismo tiempo, disponer de áreas verdes no solo mejora la calidad de vida de los ciudadanos, sino que también regula la temperatura y fomenta la conservación de la biodiversidad. Una gestión eficiente de los residuos sólidos es igualmente fundamental para minimizar los efectos negativos en el entorno y la salud colectiva.

1.2 Importancia de la Calidad Ambiental en Entornos Urbanos

La calidad ambiental en las ciudades es esencial para promover el bienestar, la salud y un desarrollo sostenible. Problemas como la contaminación del aire, la gestión ineficaz de residuos y la carencia de áreas verdes impactan de manera directa la vida de los habitantes. De acuerdo con la OMS (2021), la exposición prolongada a contaminantes atmosféricos está asociada a enfermedades graves, como afecciones respiratorias y del corazón, siendo una de las principales causas de mortalidad en áreas urbanas.

Las áreas verdes también juegan un papel crucial, ya que contribuyen a mejorar la calidad del aire, equilibrar las temperaturas y beneficiar tanto la salud física como mental de las personas (United Nations, 2022). Por último, una correcta gestión de residuos sólidos no solo reduce la contaminación, sino que también disminuye la emisión de gases de efecto invernadero, como lo menciona el Banco Mundial (2021).

1.3 Factores que influyen en la calidad ambiental urbana

La calidad ambiental urbana depende de varios factores clave:

Calidad del aire: La contaminación atmosférica, generada por el tráfico, la industria y la quema de residuos, afecta la salud de los habitantes, con consecuencias graves como enfermedades respiratorias (OMS, 2021).

Gestión de residuos sólidos: Un manejo deficiente de residuos puede contaminar el suelo y el agua, por lo que es crucial implementar sistemas de recolección y reciclaje eficientes (World Bank, 2021).

Disponibilidad de espacios verdes: Las áreas verdes mejoran la calidad del aire, reducen el estrés térmico y proporcionan espacios recreativos, promoviendo la biodiversidad y el bienestar (United Nations, 2022).

Contaminación acústica: El ruido excesivo, proveniente del tráfico y la industria, puede afectar la salud mental y física (European Environment Agency, 2020).

1.4 Gestión Ambiental Urbana

La gestión ambiental urbana enfrenta varios desafíos que afectan la sostenibilidad y la calidad de vida en las ciudades. Entre los principales retos se destacan:

Contaminación del aire y cambio climático: Las ciudades son grandes emisoras de gases contaminantes, lo que contribuye al cambio climático y a problemas de salud pública. Reducir las emisiones de carbono es una prioridad para mejorar la calidad del aire urbano (World Bank, 2021).

Manejo de residuos sólidos: El aumento de la población urbana genera una mayor cantidad de residuos, lo que pone presión sobre los sistemas de recolección y reciclaje. Mejorar la eficiencia en la gestión de residuos es crucial para minimizar la contaminación (United Nations, 2022).

Escasez de recursos naturales y uso del suelo: La urbanización creciente genera una competencia por los recursos naturales y el uso del suelo, lo que puede llevar a la destrucción de ecosistemas y a la escasez de agua potable (European Environment Agency, 2020).

Escasez de espacios verdes: La falta de áreas verdes urbanas afecta la calidad de vida de los residentes, ya que estos espacios son esenciales para la salud física y mental, además de contribuir a la mejora del microclima urbano (CRMexico, 2024).

1.4.1 Tendencias emergentes:

Planificación urbana sostenible: Se observa un mayor enfoque en la integración de espacios verdes, la promoción de energías renovables y la mejora de la infraestructura para el reciclaje (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, s.f.).

Uso de tecnología: La implementación de tecnologías avanzadas, como sensores y sistemas de monitoreo en tiempo real, permite una gestión más eficiente de los recursos y una respuesta más rápida ante emergencias ambientales (European Environment Agency, 2020).

1.5 Desafíos y Tendencias en la Gestión Ambiental Urbana

La ciudad de Nueva Loja ha implementado políticas ambientales clave para promover la sostenibilidad urbana. La Ordenanza Municipal sobre Gestión Ambiental regula el manejo de recursos naturales y residuos sólidos (GAD Municipal de Nueva Loja, 2020). Además, el Plan de Manejo Ambiental Urbano se enfoca en la reducción de la contaminación y la preservación de espacios verdes (GAD Municipal de Nueva Loja, 2021).

La Ley Orgánica de Defensa del Ambiente a nivel nacional también guía las acciones locales, especialmente en la gestión de agua y residuos (Asamblea Nacional del Ecuador, 2017). Nueva Loja también sigue la Estrategia Municipal de Cambio Climático, que promueve la movilidad sostenible y el uso de tecnologías limpias (GAD Municipal de Nueva Loja, 2020).

1.5.1. Planes de Uso y Gestión del Suelo (PUGS) en Nueva Loja

Los Planes de Uso y Gestión del Suelo (PUGS) en Nueva Loja tienen como objetivo regular el uso del suelo para asegurar un desarrollo urbano ordenado y sostenible. El Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT) del cantón Lago Agrio, que incluye a Nueva Loja, clasifica el suelo urbano en consolidado y no consolidado, lo que es clave para planificar la distribución de servicios y el crecimiento de la ciudad (GAD Municipal de Nueva Loja, 2021).

Asimismo, el plan identifica áreas de riesgo, como las zonas propensas a inundaciones de los ríos Aguarico y Cuyabeno, donde se deben aplicar medidas preventivas para proteger a la población, especialmente en barrios como Puerto Aguarico y Aguarico Mirador (GAD Municipal de Nueva Loja, 2021).

1.5.2 Planes de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT) de Nueva Loja

Los Planes de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT) de Nueva Loja son fundamentales para garantizar un crecimiento urbano ordenado. Estos planes facilitan la planificación del uso del suelo, la infraestructura y los servicios, promoviendo un desarrollo económico, social y ambiental equilibrado (GAD Municipal de Nueva Loja, 2021).

El PDOT analiza aspectos geográficos, económicos y sociales de la ciudad y define estrategias para gestionar el uso del suelo, proteger áreas naturales y mitigar riesgos como las inundaciones en áreas cercanas a los ríos Aguarico y Cuyabeno. Además, busca mejorar la infraestructura básica, como el acceso a agua potable y sistemas de transporte público (GAD Municipal de Nueva Loja, 2021).

1.6 Teledetección aplicada al estudio/monitoreo de la calidad ambiental

La teledetección es una herramienta clave para el monitoreo ambiental en Nueva Loja, permitiendo la obtención de datos sobre el medio ambiente sin intervención directa. A través de satélites y aeronaves, se puede estudiar la calidad del aire, la cobertura vegetal y la contaminación de cuerpos de agua (GAD Municipal de Nueva Loja, 2021).

En Nueva Loja, se utiliza para detectar contaminantes atmosféricos como dióxido de nitrógeno (NO₂) y material particulado (PM₁₀), lo que ayuda a identificar áreas de alto riesgo y evaluar el impacto en la salud pública. También es útil para analizar la cobertura vegetal y detectar deforestación o cambios en el uso del suelo, lo que es fundamental para la conservación de ecosistemas (Domínguez, 2022). Además, la teledetección permite monitorear la calidad del agua en ríos y lagos cercanos, facilitando la detección de contaminación y la respuesta ante posibles fuentes de riesgo (NASA Applied Sciences, 2023). El uso conjunto de teledetección y Sistemas de Información Geográfica (SIG) ayuda a

optimizar la planificación territorial y la gestión de riesgos, como inundaciones (WeAdapt, 2024).

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) es un indicador clave derivado de la teledetección que permite evaluar la salud y densidad de la cobertura vegetal, proporcionando información esencial para la conservación de ecosistemas y la planificación del uso del suelo. La Temperatura de la Superficie Terrestre (LST) se obtiene a partir de sensores térmicos y es fundamental para estudiar el efecto de la urbanización, la pérdida de cobertura vegetal y el cambio climático. Por otro lado, la Densidad de Construcción (DC) permite analizar el crecimiento urbano y su impacto en la distribución del calor y la calidad ambiental en la región.

1.7 Calidad ambiental en la ciudad de Nueva Loja

La calidad ambiental en Nueva Loja ha sido objeto de varias investigaciones que abordan los desafíos y esfuerzos para mejorar el entorno urbano. En 2022, un estudio sobre la lluvia ácida en la ciudad analizó la presencia de contaminantes en 23 puntos de muestreo, lo que permitió identificar los efectos de estos contaminantes en la salud pública y el medio ambiente (GAD Municipal de Nueva Loja, 2022).

Por otro lado, la Mesa Ambiental Provincial de Sucumbíos ha trabajado en la identificación de problemas ambientales en la ciudad, tales como la calidad del agua potable, el sistema de alcantarillado, la gestión de residuos sólidos y la contaminación del aire. Estas iniciativas buscan fomentar la participación de la comunidad y la colaboración de diversas instituciones para enfrentar los problemas ambientales de la región (USAID, 2023).

Capítulo dos

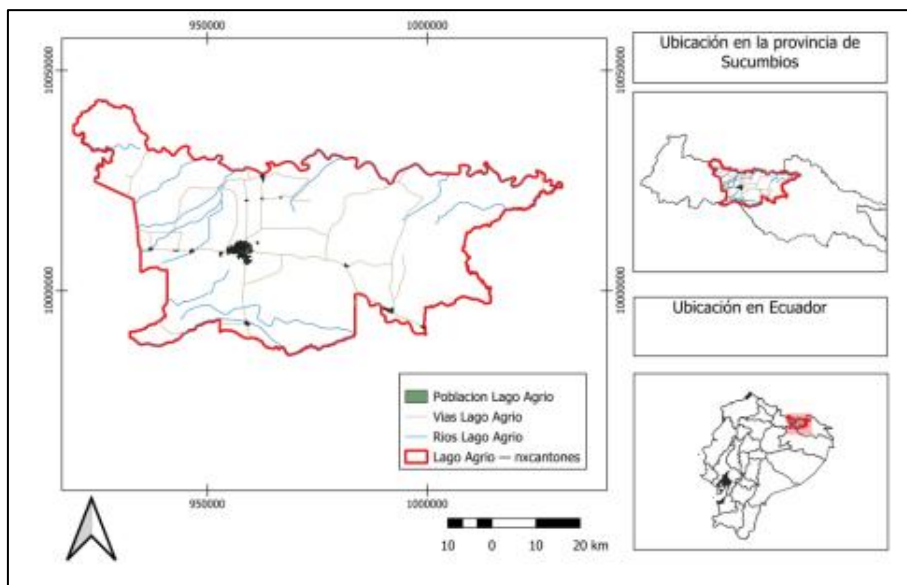
Materiales y métodos

2.1 Area de Estudio

La ciudad de Nueva Loja, ubicada al norte del Ecuador en la provincia de Sucumbíos (Figura 1), tenía una población de 91,744 habitantes según datos del INEC en 2010. Para el año 2024, se estima que su población ha aumentado a 119,594 habitantes. Según el censo realizado en 2022, la ciudad muestra una tasa de crecimiento poblacional anual del 2.18% (El Telégrafo, 2023). Nueva Loja se encuentra a una altitud de 303 metros sobre el nivel del mar y posee un clima ecuatorial húmedo, con un índice de humedad del 64% y una temperatura promedio de aproximadamente 29°C. La principal actividad económica de la ciudad es la extracción de hidrocarburos.

Figura 1

Ubicación de la ciudad de Nueva Loja



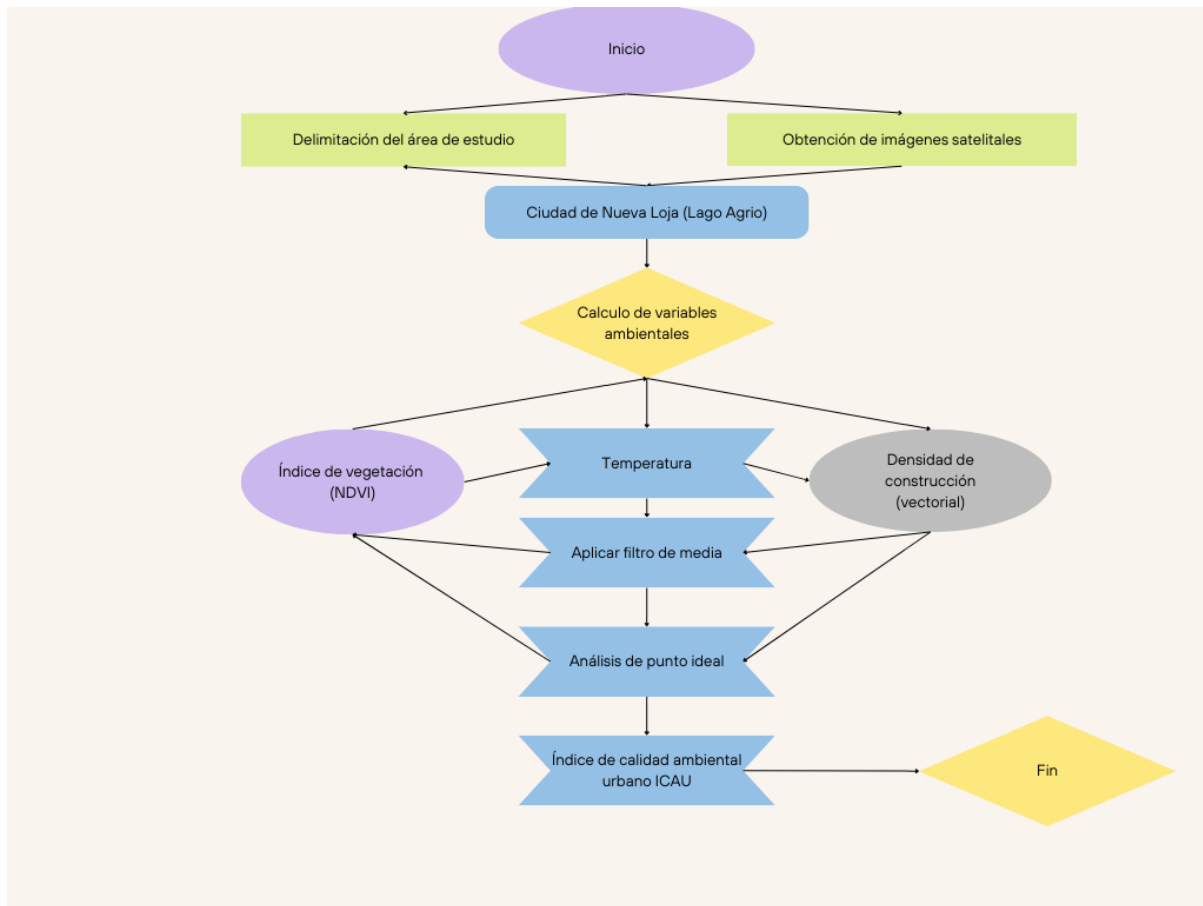
2.2 Metodología para el primer objetivo: Describir variables relacionadas a la calidad ambiental de la ciudad de Nueva Loja a partir de sensores remotes, para generar información de base

La obtención de la información fundamental se realiza a través de la recopilación de los siguientes parámetros: el índice de vegetación (NDVI), la temperatura de la superficie

terrestre (LST) y la densidad de construcción según Mishra. En la Figura 2 se presenta un resumen del procedimiento llevado a cabo para alcanzar el primer objetivo.

Figura 2

Diagrama metodológico de las variables de la calidad ambiental

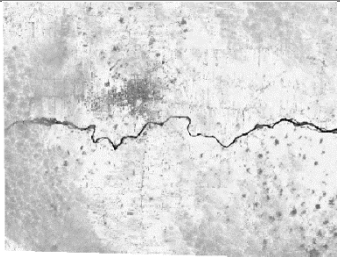
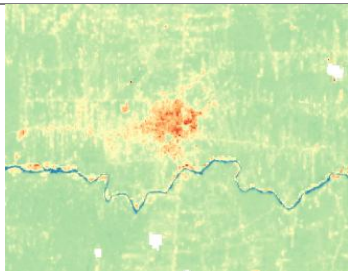
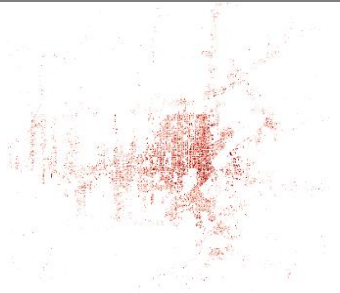


2.2.1 Recopilación de datos

La información se recopiló a partir de las siguientes fuentes: NDVI (Sentinel 2), Temperatura (productos LST de Landsat 8) y densidad de construcción (Building footprint de Bing). La selección de estas variables se basa en el estudio de Mishra et al. (2018), quienes proponen un índice para evaluar calidad ambiental aprovechando la disponibilidad de datos de teledetección en un contexto de escasez de datos de campo. Se verificaron las fechas para asegurar que la cobertura de nubosidad fuera baja. La Tabla 1 presenta un detalle de las fuentes utilizadas junto con las características específicas de las resoluciones incluidas.

Tabla 1

Descripción de los datos utilizados en el estudio

Indicador	Satélite/Sensor	Fuente	Fecha de captura	Resolución
Índice de vegetación de diferencia normalizada	Sentinel 2	Copernicus	20/11/2022	 10 metros
Temperatura superficial terrestre	Lansat 8 colección 2 nivel 2	GoogleEarth Explore	2023	 60 metros
Densidad de construcción Vectorial (DC)	SouthAmerica buildingFootprints	Building footprint de Bing	2023	 10 metros

2.2.2 Índice de vegetación de diferencia Normalizado (NDVI)

El cálculo del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) se realizó comparando la reflectancia en el infrarrojo cercano y el rojo visible, lo que facilita la evaluación de la salud de la vegetación. Este índice varía entre -1 y +1. Valores negativos corresponden a áreas con superficies de agua, estructuras artificiales, rocas, nubes o nieve; el suelo desnudo generalmente se encuentra dentro del rango de 0,1 a 0,2; y las plantas siempre tendrán valores positivos entre 0,2 y 1. Un dosel de vegetación sano y denso debería estar por encima de 0,5, mientras que la vegetación dispersa probablemente caerá dentro de 0,2 a 0,5 (CursosTeledeteccion.com, 2019).

La fórmula para este índice es:

$$NDVI = \left(\frac{NIR - RED}{NIR + RED} \right)$$

NDVI: Índice de Vegetación de diferencia normalizada

NIR: Representa la reflectancia en la banda del infrarrojo cercano

RED: Representa la reflectancia en la banda del rojo

2.2.3 Densidad de construcción

Este indicador se refiere específicamente al entorno urbano construido y permite evaluar la densidad de edificaciones en un área determinada. Para su cálculo, se utilizó la base de datos Building Footprint de Bing como referencia.

Se generó una cuadrícula con una resolución de 10x10 metros, alineada con la resolución del NDVI obtenido a partir de imágenes del satélite Sentinel-2. Luego, esta cuadrícula fue superpuesta con la capa de edificaciones, lo que permitió determinar el porcentaje de área ocupada por construcciones en cada sección. Así, a cada píxel se le asignó un valor según los siguientes criterios:

- 0% representa la ausencia total de edificaciones en el píxel.
- 100% indica que el píxel está completamente edificado.

El índice Roof Coverage Ratio (RCR), que expresa la proporción de edificaciones en relación con el área total, se calculó utilizando la siguiente fórmula:

$$RCR(\%edificacionesporárea) = \frac{\text{Área total de techo}}{\text{Área total del píxel}}$$

En esta investigación, la superficie construida se define como la parte edificada dentro de cada píxel, mientras que el área total del píxel representa la unidad espacial de análisis con dimensiones de 10x10 metros.

2.2.4 Temperatura superficial terrestre

La variable de Temperatura de la Superficie Terrestre (LST) se calculó mediante un ajuste de la radiancia y la emisividad utilizando un factor de escala, lo que permitió convertir los datos en temperatura de brillo y, posteriormente, en temperatura superficial. Este

procedimiento se llevó a cabo mediante la plataforma Google Earth Engine (GEE), lo que facilitó la determinación de la temperatura en la zona de estudio.

El proceso de estimación de LST partió de datos satelitales crudos, específicamente de la banda térmica, y requirió varias transformaciones matemáticas. Inicialmente, la banda ST_TRAD fue ajustada con un factor de escala de 0.001, obteniendo así una banda calibrada en radiancia. Posteriormente, se realizó una conversión de los valores de radiancia espectral para calcular la temperatura de brillo, aplicando constantes predefinidas en una fórmula específica. Este paso resultó fundamental para interpretar los datos térmicos de manera más significativa y adecuada para los análisis posteriores.

$$TB = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L\lambda} + 1\right)} - 273.5$$

Donde:

TB: Temperatura de Brillo °C

K2: Constante de Calibración

K1: Constante de calibración

Lλ: Radiancia espectral en W.

En la estimación de la Temperatura de la Superficie Terrestre (LST) para la ciudad de Nueva Loja, se aplicó una fórmula específica que combina constantes y parámetros clave para asegurar un cálculo preciso de la temperatura. Este enfoque incluyó la conversión de datos de radiancia espectral provenientes de imágenes satelitales, junto con ajustes relacionados con factores de escala y la emisividad superficial.

Además, se incorporaron características particulares del área de estudio, como las condiciones climáticas locales y las fluctuaciones estacionales, lo que permitió refinar la precisión del modelo. Este nivel de ajuste garantizó resultados más representativos tanto del entorno urbano como del periurbano de la región.

$$T_s = T / \left(1 + \frac{\lambda T}{\alpha} \ln \varepsilon\right) - 273.5$$

Donde:

T_s: Temperatura de la superficie terrestre en °C

λ : Longitud de onda del resplandor emitido

α : hc/K (1.438×10^{-2} m K);

h: Constante de Planck (6.26×10^{-34} Js);

c: Velocidad de la luz (2998×10^8 m s⁻¹);

K: Constante de Blzman (1.38×10^{-23} j K⁻¹).h

ϵ : Banda de emisividad * 0.001

2.3 Establecer zonas prioritarias a través de la integración de variables relacionadas a la calidad ambiental, para proponer estrategias de mejora

2.3.1 Cálculo del índice de calidad ambiental usando el método de Análisis del punto ideal

2.3.1.2. Normalización de las variables

Las variables calculadas previamente reflejan diferentes fenómenos ambientales y tienen escalas y rangos que no son compatibles entre sí. Por esta razón, es necesario normalizarlas a una escala común que facilite su comparación y combinación de manera consistente.

La normalización transforma los valores originales de cada variable en un rango estándar de 0 a 1, donde (Santé & Crecente, 2014):

- 0 indica el valor menos favorable en términos de calidad ambiental.
- 1 indica el valor más favorable en términos de calidad ambiental.

Para estandarizar el NDVI, se asumió que un valor más bajo del NDVI refleja una calidad ambiental inferior, mientras que un valor más alto señala una mejor calidad ambiental.

La normalización se llevó a cabo mediante la siguiente fórmula:

$$Valor\ estandarizado = \frac{valor - valor\ mínimo}{valor\ máximo - valor\ mínimo}$$

$$1 - Valor\ estandarizado$$

Esto también se aplica al LST y al DC, ya que su relación es inversa: un mayor valor en estas variables implica una menor calidad ambiental.

2.3.1.3. Análisis de punto ideal

Se integraron las variables obtenidas previamente utilizando el método del punto ideal. En este caso, la puntuación más baja del indicador corresponde a 0 y la más alta a 1. Según la metodología descrita por Mishra et al. (2018), tanto el índice NDVI como la temperatura de la superficie terrestre se consideraron con menor relevancia en comparación con la densidad de edificios, ya que esta última variable cuenta con una mayor resolución y, por ende, con menor incertidumbre. De este modo, la ecuación basada en el punto ideal se definió de la siguiente forma:

$$L_2 = \left[\sum_{j=1}^n W_j |e_{ij} - 1|^2 \right]^{1/2} \text{ (Distancia Euclidiana)}$$

El análisis de punto ideal es una técnica de evaluación multicriterio que se basa en medir la distancia de cada alternativa respecto a un punto ideal, el cual representa los valores óptimos de todos los factores considerados. Este método sobresale por su habilidad para combinar diversas variables, permitiendo que valores bajos en ciertos criterios sean compensados por otros más altos, lo que ayuda a minimizar la subjetividad característica de enfoques cualitativos (Santé & Crecente, 2014). La distancia euclidiana de cada alternativa al punto ideal se determinó utilizando la siguiente ecuación:

$$L_p = \left[\sum_{j=1}^n w_j |e_{ij} - 1|^p \right]^{1/p}$$

Donde:

L_p: distancia euclidiana entre la alternativa i (celda i) y el punto ideal de aptitud,

W_j: peso del factor j,

e_{ij}: valor normalizado de la alternativa i en el factor j,

1: valor del punto ideal para factores normalizados entre 0 y 1 y

p: métrica utilizada. A medida que el valor de p se incrementa, las desviaciones de los factores individuales adquieren una mayor relevancia. En este análisis, se empleará un valor de p igual

a 2 (distancia euclidiana), lo que implica una compensación parcial entre los distintos factores de evaluación.

2.3.2 Interpretación de variables

En esta etapa, se realizó una interpretación de los resultados del índice de calidad ambiental, clasificando el valor del índice en los siguientes niveles de calidad: excelente (0,70 – 0,80), buena (0,61 – 0,70), moderada (0,51 – 0,61), mala (0,42 – 0,51) y muy mala (0,32 – 0,42), según la (Tabla 2). Esta calificación ofrece una evaluación global de la calidad ambiental de la zona estudiada, proporcionando una visión integral de la situación ambiental en la región.

Tabla 2

Calificación de los indicadores de calidad ambiental

<i>ICAU</i>	<i>Rango</i>
Muy Mala	0.32 - 0.42
Mala	0.42 - 0.51
Moderada	0.51 - 0.61
Buena	0.61 - 0.70
Excelente	0.70 - 0.80

2.3.3 Identificación de áreas prioritarias

Después, se incorporaron las variables individuales junto con el índice de calidad ambiental calculado a nivel de sector censal, dado que esta es la unidad territorial más pequeña con información censal cartográfica detallada.

Posteriormente, se creó una base de datos que integró tanto las variables ambientales como distintos aspectos socioeconómicos, entre ellos:

- Porcentaje de población con acceso a servicios básicos.
- Densidad poblacional.

Con esta base de datos consolidada, se aplicó el algoritmo k-means, una técnica de agrupamiento no supervisado utilizada para segmentar un conjunto de datos en un número determinado de grupos o clusters mediante análisis de conglomerados en R 4.4.1 (Ramírez,

2024). Este procedimiento permitió identificar zonas con características homogéneas en cuanto a calidad ambiental y condiciones socioeconómicas.

Como resultado, se logró dividir el área de estudio en regiones con condiciones similares, lo que facilitó la formulación de recomendaciones específicas para cada zona. Estas sugerencias están dirigidas principalmente a mejorar el verde urbano, promoviendo una planificación más equitativa y eficiente.

2.3.4 Comparación del ICAU con otras variables

Se utilizaron imágenes satelitales del sensor Sentinel-5 para la ciudad de Nueva Loja, enfocándose en la detección de los contaminantes monóxido de carbono (CO) y dióxido de azufre (SO₂). Estas imágenes, con una resolución aproximada de 10 x 10 km, permitieron identificar patrones espaciales de contaminación a nivel regional en el área urbana.

Posteriormente, se llevó a cabo una comparación visual entre la distribución espacial de CO y SO₂ y el Índice de Calidad Ambiental Urbana (ICAU). Este análisis preliminar permitió evaluar si los patrones de distribución de los contaminantes coinciden con las zonas de distinta calidad ambiental establecidas por el ICAU. La comparación visual sirvió como una primera aproximación para determinar la validez del ICAU como herramienta de estimación de la calidad ambiental urbana y proporcionó una base para estudios más detallados.

Capítulo tres

Resultados

3.1 Análisis de resultados

3.1.1 Descripción de variables relacionadas a la calidad ambiental en la ciudad de Nueva Loja a partir de sensores remotos, para generar información base

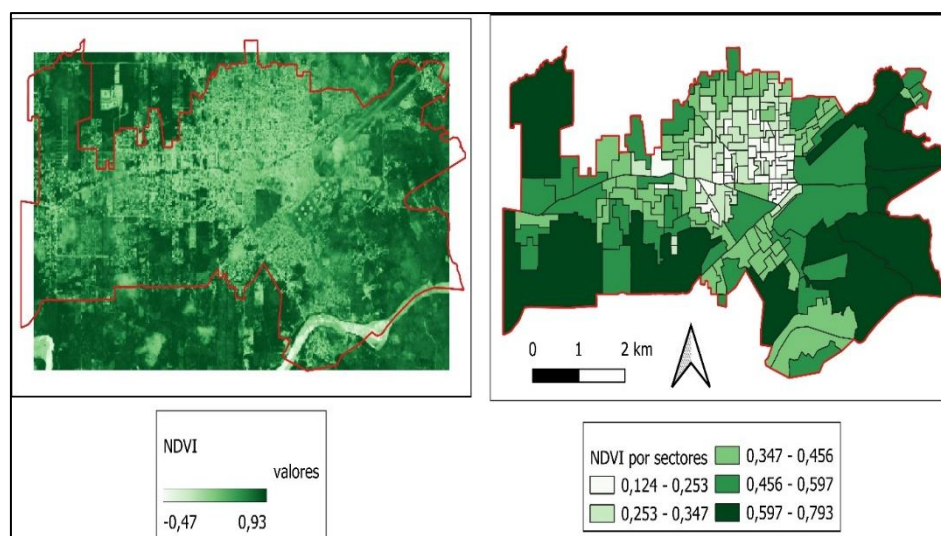
3.1.1.1 Índice de vegetación NDVI

Como se puede apreciar en el mapa de la Figura 3, la densidad de la vegetación en el año 2022 mostró valores medianamente altos del indicador en las zonas periféricas de la ciudad de Nueva Loja. La zona censal de la parte oriental de la ciudad es donde se evidencia un valor de NDVI promedio más alto (0,79).

También se puede realizar una observación del valor más bajo en la parte central de la ciudad, que está más consolidada dando un valor promedio de 0,12. Los valores más altos del índice representan los límites de la zona urbana, en donde existe una mayor densidad de vegetación, por la existencia de boques, agricultura, así como la poca presencia de áreas edificadas.

Figura 3

Índice de vegetación de diferencia normalizada de la ciudad de Nueva Loja



Las zonas censales de Nueva Loja con valores altos de NDVI abarcan el 42,47% del área dentro del límite urbano, caracterizándose por una cobertura vegetal abundante,

principalmente en las áreas periféricas de la ciudad. De manera similar, las zonas con una densidad de vegetación clasificada como “Alta” representan el 26,90% de la superficie urbana, ubicándose mayormente en las afueras de la ciudad.

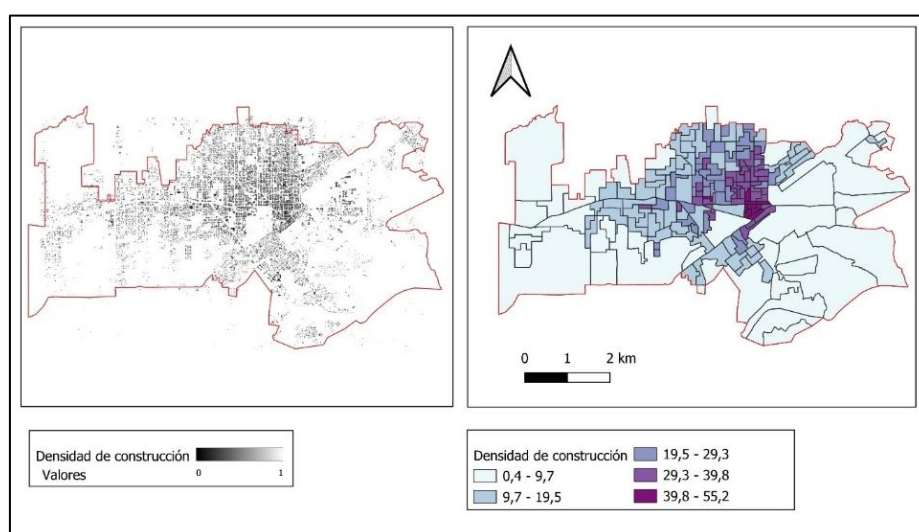
Por otro lado, las zonas censales con una clasificación de NDVI “Media” cubren el 18,02% del área dentro del límite urbano, situándose en sectores más cercanos a la zona urbanizada. En contraste, las zonas con calificación de NDVI “Baja” y “Muy Baja” comprenden el 8,34% y el 4,38% del área urbana, respectivamente, concentrándose en el centro de la ciudad de Nueva Loja, donde la densidad de vegetación es considerablemente menor.

3.1.1.2 Densidad de construcción

Los resultados sobre la densidad de construcción en la ciudad de Nueva Loja se presentan en la figura 4. Se ilustra la distribución de la densidad de edificaciones correspondientes al año 2022 en las zonas manzanales de la ciudad. Las áreas con una alta concentración de construcciones están marcadas con un color morado intenso, concentrándose principalmente en las zonas céntricas y sus alrededores. Por otro lado, los tonos de morado menos intenso representan áreas con una menor concentración de construcciones.

Figura 4

Densidad de construcción de la ciudad de Nueva Loja del area urbana



Según los datos obtenidos, aproximadamente el 71,58% de la superficie dentro del límite urbano de Nueva Loja corresponde a zonas censales con una densidad de construcción “Muy Baja”, concentrándose principalmente en los límites de la ciudad. A esta categoría le sigue la densidad “Baja”, que abarca el 17,81% del área urbana y se ubica en las afueras del sector central.

Por su parte, las zonas censales con densidad de construcción “Media” representan el 6,06% del área dentro del límite urbano, situándose en sectores cercanos al centro de la ciudad. Finalmente, las categorías de densidad “Alta” y “Muy Alta” abarcan el 3,87% y el 0,67% de la superficie urbana, respectivamente, concentrándose en la zona central, donde se encuentran áreas más compactas y edificadas.

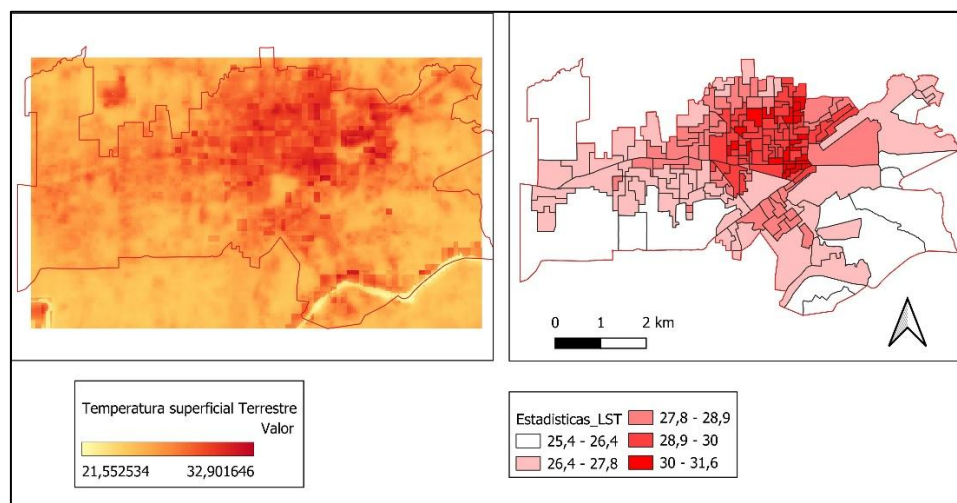
3.1.1.3 Temperatura superficial terrestre

De acuerdo con el rango de temperaturas presentado en la Figura 5, se observa que las áreas más frías se ubican en las zonas periféricas de la ciudad de Nueva Loja, con temperaturas que oscilan entre 25,4°C y 26,4°C. Por otro lado, el centro de la ciudad registra una mayor concentración poblacional y una creciente densidad de edificaciones, lo que genera temperaturas elevadas, que varían entre 30°C y 31,6°C. Este incremento térmico se relaciona con la escasa presencia de vegetación, según lo evidenciado por los valores del NDVI.

En cambio, las temperaturas en el centro de Nueva Loja tienden a ser más altas que en las áreas periféricas. Una de las principales causas de este fenómeno es la disminución de áreas verdes y el incremento en la densidad de construcciones, lo cual intensifica el calor. De esta forma, en zonas con menor densidad de edificaciones y mayor presencia de vegetación, las temperaturas son más bajas y agradables.

Figura 5

Temperatura superficial terrestre de la ciudad de Nueva Loja del area urbana

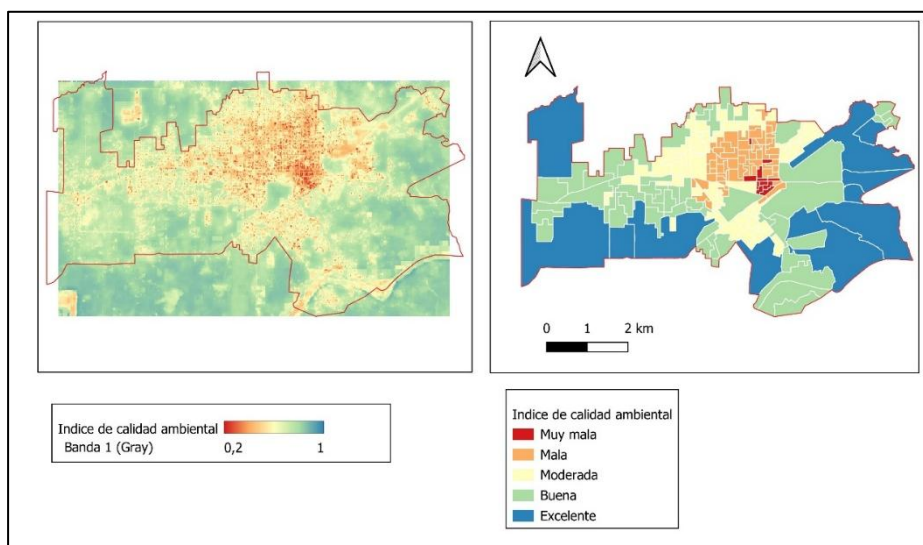


3.1.1.4 Índice de calidad ambiental urbana

Como se observa en la Figura 6, la ciudad de Nueva Loja presentó una distribución espacial de la calidad ambiental en forma de anillos concéntricos. Este patrón indica que, a medida que se aumenta la distancia del centro urbano, la calidad ambiental tiende a mejorar. Los sectores con una calidad ambiental clasificada como "Muy mala" se concentran en el centro de la ciudad, caracterizado por una alta densidad poblacional y una intensa urbanización. Estas zonas destacan por una limitada cobertura vegetal y una mayor variación en la temperatura. En contraste, los sectores con una calidad ambiental calificada como "Excelente" se encuentran en las áreas periféricas de Nueva Loja. Estas zonas presentan una elevada cobertura vegetal y una mínima densidad de construcciones, lo que favorece condiciones ambientales óptimas. Por otro lado, los sectores clasificados con calidad ambiental "Moderada" están situados en los alrededores del centro urbano, donde tanto la densidad poblacional como la urbanización disminuyen gradualmente. Finalmente, las zonas con una calidad ambiental "Buena" se distribuyen significativamente en las áreas periféricas de la ciudad, extendiéndose hacia los límites urbanos e incluyendo las parroquias urbanas de Nueva Loja.

Figura 6

Índice de calidad ambiental urbano de la ciudad de Nueva Loja del area urbana



Los resultados obtenidos sobre la calidad ambiental urbana de la ciudad de Nueva Loja se presentan desglosando los valores y porcentajes correspondientes a cada categoría del Índice de Calidad Ambiental Urbana (ICAU). Según el análisis, las zonas censales con una calidad ambiental clasificada como “Muy Mala” abarcan el 0,92% de la superficie dentro del límite urbano. Por otro lado, las zonas con calidad ambiental “Mala” representan apenas el 0,01% del área urbana, seguidas de aquellas con calidad “Moderada”, que cubren el 13,92% de la superficie urbana.

Por su parte, las zonas censales con una calidad ambiental clasificada como “Buena” comprenden el 37,86% del área dentro del límite urbano, mientras que aquellas con una clasificación “Excelente” abarcan el 47,30%, siendo la categoría predominante. Estos resultados reflejan que la ciudad de Nueva Loja mantiene un índice de calidad ambiental urbana mayormente positivo. Esto se debe, en gran medida, a la presencia de extensas áreas verdes y parques destinados a la conservación de la estética urbana y al bienestar ambiental de sus habitantes (Röbbel, 2016).

3.1.2 Comparación del Índice de Calidad Ambiental Urbana con el Patrón Espacial de contaminantes Atmosféricos

3.1.2.1 Clustering de variables ambientales

Como se aprecia en la Figura 7, las variables ambientales se han clasificado en cuatro categorías principales, destacando sus requerimientos específicos y planteando estrategias para su manejo sostenible. Estas iniciativas están orientadas a fortalecer la relación entre las demandas ciudadanas y las soluciones propuestas.

La zona 1 (color rosa) se caracteriza por ser un área densamente urbanizada con deficiencias en infraestructura y servicios básicos, lo que afecta la calidad de vida de sus habitantes. Para esta zona, la estrategia de diseño urbano sostenible es la más adecuada, ya que busca mejorar la habitabilidad a través de la integración de áreas verdes, el fomento de la movilidad sostenible y el uso de materiales ecológicos en la construcción. Estas acciones contribuirían a mitigar el efecto de isla de calor y mejorar la calidad ambiental en el área (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [PNUMA], 2021).

La zona 2 (color verde) corresponde a sectores degradados con altos niveles de contaminación y pérdida de cobertura vegetal. En este contexto, la estrategia de restauración de zonas desgastadas es prioritaria, incluyendo acciones como la reforestación, la recuperación de suelos erosionados y la descontaminación de cuerpos de agua. Además, se promoverá la participación comunitaria en programas de restauración ambiental, fomentando la educación y el compromiso social para la conservación del entorno.

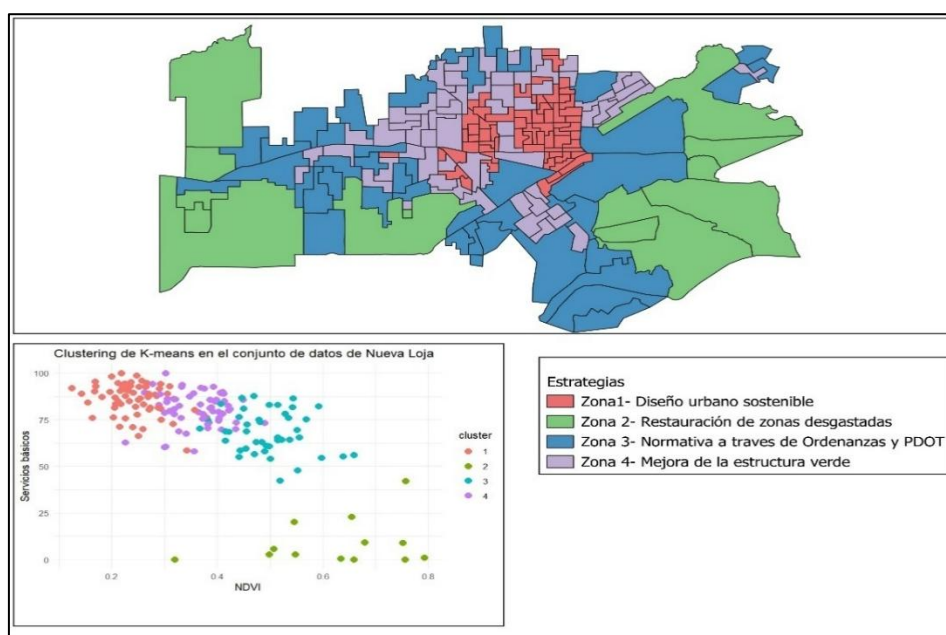
La zona 3 (color azul) está conformada por áreas en proceso de urbanización y expansión, donde la falta de regulación puede generar un crecimiento desordenado. En este caso, la estrategia de normativa a través de ordenanzas y el PDOT es clave para establecer directrices de planificación que regulen el uso del suelo, protejan zonas ecológicas sensibles y fomenten la construcción sustentable. Esto permitiría equilibrar el desarrollo urbano con la conservación ambiental, asegurando una distribución adecuada de espacios habitacionales, comerciales y naturales.

Finalmente, la zona 4 (color morado) abarca áreas con una alta cobertura vegetal y un gran potencial ecológico. Para maximizar sus beneficios ambientales, la estrategia de mejora de la estructura verde es fundamental, promoviendo la creación de corredores

biológicos que conecten espacios naturales, la reforestación con especies autóctonas y la implementación de programas de monitoreo y educación ambiental. Estas acciones contribuirán a la conservación de la biodiversidad y al fortalecimiento de los servicios ecosistémicos que brindan estos espacios verdes.

Figura 7

Estrategias de Gestión Territorial Sostenible Basadas en Clustering para Nueva Loja



Las variables ambientales fueron evaluadas con base en las particularidades de cada zona, tal como se muestra en el mapa anterior. En este contexto, la tabla 3 resume los datos y los presenta en forma de estadísticas porcentuales, resaltando los valores específicos de cada área. Los porcentajes se determinaron teniendo en cuenta los indicadores más significativos: acceso de la población a servicios básicos, densidad de edificaciones, temperatura superficial, índice de vegetación y densidad de población.

Tabla 3*Resumen de Indicadores Ambientales y Urbanos por Clúster*

Clu ster	%Pobl. Serv. basicos	% Densidad de construcción	% Temperatura superficial	% Índice de Vegetación	% Densidad Poblacional
1	86,20	33,75	29,86	0,24	72,43
2	9,01	3,99	26,36	0,62	6,31
3	68,31	8,65	27,22	0,50	21,56
4	80,65	17,86	28,61	0,36	42,13

El estudio de las variables ambientales reveló diferencias importantes entre los cuatro clústeres analizados. En relación al acceso de la población a servicios básicos, el Clúster 1 presentó el porcentaje más elevado (86,20%), evidenciando un nivel superior de desarrollo en infraestructura esencial. En contraste, el Clúster 2 registró el porcentaje más bajo (9,01%), lo que pone de manifiesto una notable vulnerabilidad en este ámbito.

En cuanto a la densidad de construcción, el Clúster 1 se posiciona con el porcentaje más elevado (33,75%), reflejando una zona altamente urbanizada y con una considerable concentración de edificaciones. Por otro lado, el Clúster 2 de igual manera muestra el valor más bajo (3,99%), indicando un territorio mayormente rural o con un desarrollo urbano limitado.

En cuanto a la temperatura en la superficie, aunque las variaciones entre los clústeres no son tan marcadas, el Cluster 1 presenta la cifra más alta (29,86%), probablemente debido a su mayor densidad de edificación, lo que podría generar un efecto de área de aumento térmico. Por otro lado, el Cluster 2, con el valor más bajo (26,36%), se mantiene en una cifra similar, pero podría verse afectado por su mayor cobertura vegetal.

El índice de vegetación muestra que el Cluster 2 tiene el valor más alto (0,62), lo que indica una mayor cobertura vegetal y un medio probablemente más natural. En cambio, el Cluster 1 presenta el índice más bajo (0,24), lo que confirma su carácter urbanizado y la limitada presencia de áreas verdes.

Por último, respecto a la densidad poblacional, el Cluster 1 destaca con un valor elevado (72,43%), mientras que el Cluster 2 muestra la densidad más baja (6,31%). Esto refuerza las diferencias en el nivel de urbanización y desarrollo entre ambos clústeres, con el Cluster 1 siendo una zona altamente poblada y el Cluster 2 una área menos densamente habitada.

3.1.2.2 Relación de contaminantes atmosféricos con la ciudad de Nueva Loja

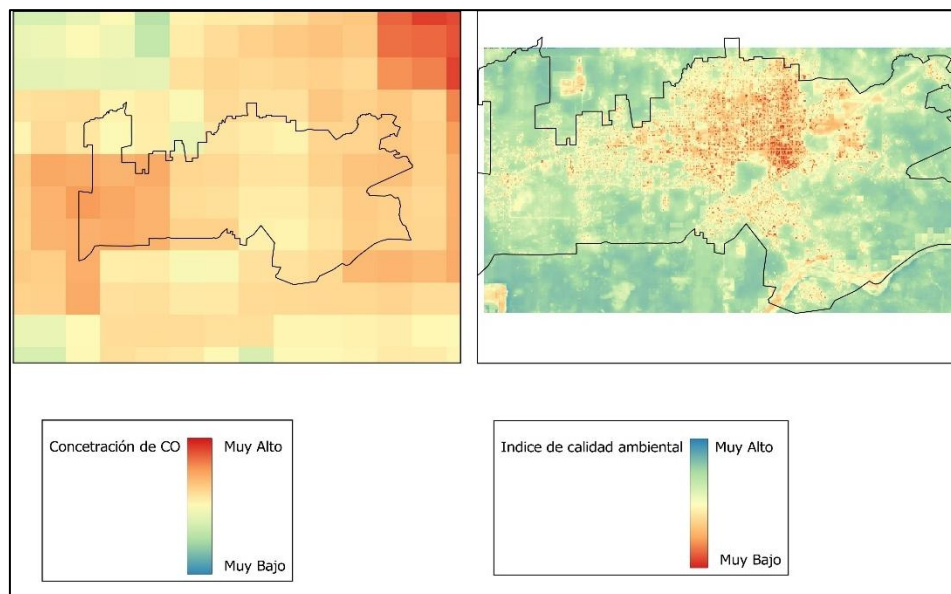
En ciudades como Nueva Loja, los contaminantes como el monóxido de carbono (CO) y el dióxido de azufre (SO₂) tienen consecuencias negativas tanto para la salud de las personas como para el medio ambiente. El CO, que se genera principalmente por la quema incompleta de combustibles fósiles, puede dificultar la circulación de oxígeno en la sangre, afectando especialmente a los grupos vulnerables como niños y personas mayores (World Health Organization [WHO], 2020). Por su parte, el SO₂, relacionado con la actividad industrial, favorece la formación de lluvia ácida y puede irritar las vías respiratorias, agravando enfermedades como el asma (U.S. Environmental Protection Agency [EPA], 2019).

En Nueva Loja, una ciudad con alta concentración de población y limitada infraestructura para el control de la contaminación, estos gases contaminantes pueden generar un aumento en las enfermedades respiratorias y cardíacas, afectando la calidad de vida de los habitantes (González et al., 2022). Además, los costos asociados con el tratamiento de enfermedades relacionadas con la contaminación, junto con la pérdida de productividad laboral, perjudican la economía local (Martínez & Pérez, 2021).

Como se muestra en la figura 8, la concentración de monóxido de carbono (CO) en la ciudad es más elevada, particularmente en las áreas centrales. Esto se debe principalmente al elevado tráfico vehicular y las actividades comerciales, que son las principales fuentes de emisión de CO. En contraste, las zonas periféricas de la ciudad tienen índices de CO más bajos, lo que indica una menor densidad de población en esas áreas, que están en su mayoría compuestas por espacios verdes, como se puede verificar mediante el índice NDVI.

Figura 8

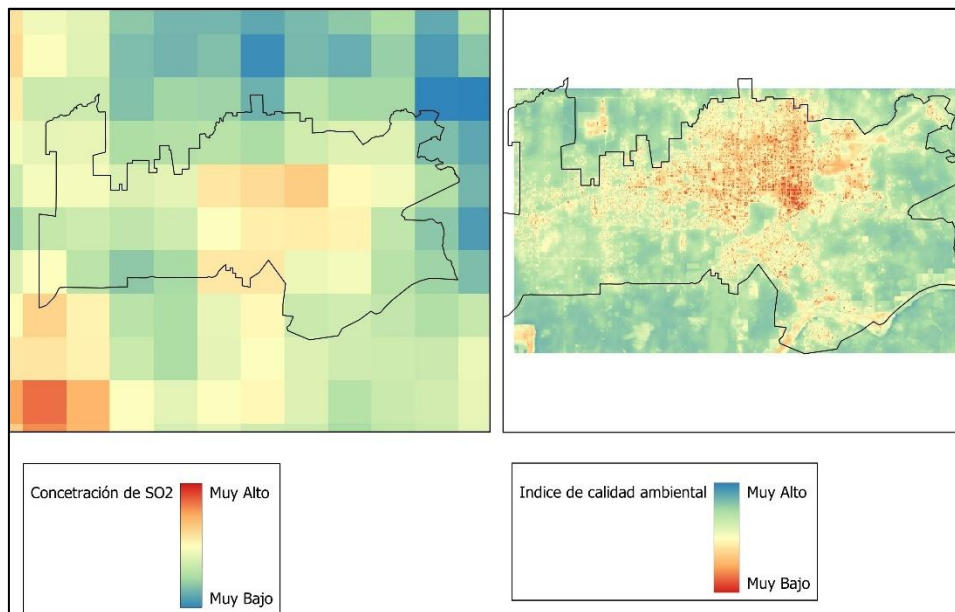
Presencia de Monóxido de carbono (CO) en la ciudad de Nueva Loja comparado con el ICAU



Como se muestra en la Figura 9, el dióxido de azufre (SO_2) está más presente en las áreas centrales de la ciudad debido al tráfico generado por el comercio y la movilidad. Esta concentración representa un riesgo para la salud humana, ya que la exposición prolongada al SO_2 puede irritar las vías respiratorias y deteriorar la calidad del aire. Sin embargo, fuera de las zonas centrales, el índice de SO_2 es considerablemente más bajo, lo que se debe a la menor densidad poblacional en esos sectores.

Figura 9

Presencia de Dióxido de azufre (SO₂) en la ciudad de Nueva Loja comparado con el ICAU



Los contaminantes atmosféricos son una de las principales causas de problemas de salud en las zonas periurbanas, las cuales requieren un control efectivo que, por ahora, no se está implementando adecuadamente. Detectar estos contaminantes es esencial para que las autoridades tomen conciencia de la urgencia de implementar medidas, establecer restricciones en su emisión y desarrollar planes que permitan a la población evitar su exposición.

3.2 Discusión de resultados

Los resultados obtenidos al analizar el índice de vegetación (NDVI), la densidad de construcción (DC) y la temperatura superficial del terreno (LST) revelaron patrones interesantes sobre la calidad ambiental urbana en la ciudad de Nuevo Loja. El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) muestra una correlación significativa entre áreas con alta cobertura vegetal y entornos urbanos potencialmente más saludables. Las áreas con valores NDVI más altos se ubican principalmente en las periferias, donde el ambiente tiene una biodiversidad más rica. Este hallazgo es estable con el estudio de Yengoh et al. (2015), quienes demostraron que las áreas urbanas con más vegetación tienden a tener una mejor calidad ambiental.

Además, el aumento de la vegetación se asoció con una disminución de la temperatura superficial, lo que también coincide con lo reportado por Tzoulas et al. (2007), quienes observaron una asociación positiva entre los espacios verdes urbanos y la mejora de la salud y el bienestar. Sin embargo, vivir en una zona con un NDVI alto no garantiza acceso a servicios básicos, evidenciando una desigualdad espacial frente a las zonas urbanas bien equipadas. En ciudades en expansión, las áreas con alta NDVI pueden carecer de infraestructura debido a una planificación inadecuada, lo que favorece el crecimiento informal. Esto refleja una paradoja entre urbanización y calidad ambiental, donde las zonas con servicios desarrollados suelen presentar un menor NDVI, mientras que aquellas con menor nivel socioeconómico pueden enfrentar problemáticas ambientales adicionales, como residuos sólidos y contaminación del agua (Yengoh et al., 2015; Tzoulas et al., 2007).

Por otra parte, el Índice de Densidad de Construcción (DC) muestra que la zona centro de Nuevo Loja presenta una alta concentración de edificaciones, lo que ocasiona sobreurbanización y el fenómeno de isla de calor urbana. Este hallazgo es similar a los resultados de Chen et al. (2016), quienes estudiaron el crecimiento urbano en otras ciudades utilizando NDVI y concluyeron que la alta densidad de edificios en áreas urbanas aumenta la temperatura de la superficie terrestre (LST) y reduce los espacios verdes. En este estudio, encontramos que las áreas con mayores densidades de construcción están fuertemente asociadas con temperaturas más altas, lo que puede afectar negativamente la calidad ambiental. La distribución espacial de contaminantes atmosféricos (CO y SO₂) también coincide con las zonas más densamente construidas, lo cual subraya la importancia de conservar los espacios verdes.

El índice de temperatura de la superficie terrestre (LST) es clave para comprender los microclimas urbanos, especialmente en áreas urbanas densamente pobladas. Los resultados del índice muestran que las áreas con mayor densidad de edificación tienen temperaturas más altas, lo que es consistente con estudios previos, como el de Santamouris (2014), quien sostiene que las temperaturas más altas en áreas de alta densidad son un fenómeno común

en las ciudades, lo cual puede mitigarse mediante la integración de espacios verdes (Santamouris, 2014).

Si bien el análisis realizado aporta información relevante sobre la calidad ambiental urbana, presenta algunas limitaciones. Investigaciones recientes (Grande Ayala, 2024) han incluido variables adicionales, como el impacto del uso del suelo y la movilidad urbana, proporcionando un panorama más completo de la sostenibilidad ambiental en ciudades.

A pesar de estas limitaciones, el estudio permite identificar la relación entre vegetación, densidad de construcción y temperatura, lo que puede servir de base para futuras investigaciones que integren más variables ambientales. Es recomendable que estudios posteriores incorporen datos de humedad y contaminación sonora para lograr una evaluación más detallada y precisa del ambiente urbano. Finalmente, los hallazgos resaltan la importancia de una planificación urbana que considere la distribución adecuada de espacios verdes y el control de la densidad en áreas clave, contribuyendo así a la creación de ciudades más sostenibles y habitables.

Sin embargo, vivir en una zona con un NDVI alto no garantiza acceso a servicios básicos, evidenciando una desigualdad espacial frente a las zonas urbanas bien equipadas. En ciudades en expansión, las áreas con alta NDVI pueden carecer de infraestructura debido a una planificación inadecuada, lo que favorece el crecimiento informal. Esto refleja una paradoja entre urbanización y calidad ambiental, donde las zonas con servicios desarrollados suelen presentar un menor NDVI, mientras que aquellas con menor nivel socioeconómico pueden enfrentar problemáticas ambientales adicionales, como residuos sólidos y contaminación del agua.

Conclusiones

El análisis de las variables ambientales en la ciudad de Nueva Loja durante el año 2022 permite identificar patrones claros relacionados con la densidad de vegetación, densidad de construcciones, temperatura superficial, calidad ambiental y contaminantes atmosféricos. Las zonas periféricas presentan características favorables, como una mayor cobertura vegetal y menores temperaturas, contrastando con el núcleo urbano, que exhibe una mayor densidad de edificaciones, temperaturas más elevadas y una calidad ambiental deteriorada.

En términos de densidad de vegetación, los valores más altos del NDVI se concentran en las áreas periféricas, donde predominan bosques, actividades agrícolas y escasas edificaciones. Estas zonas alcanzan un índice promedio elevado (0,79) y una cobertura vegetal "Alta" en el 26,90% del territorio. Por el contrario, el centro urbano refleja un índice "Muy bajo" (0,12), asociado a la consolidación de construcciones.

La densidad de edificaciones sigue un gradiente similar, con la mayor concentración en el núcleo urbano, representando un 3,87% de densidad "Alta" y 0,67% de densidad "Muy alta". En las periferias, más del 70% del área presenta densidad constructiva "Muy baja". Este contraste influye directamente en las temperaturas superficiales, que oscilan entre 25,4°C y 26,4°C en las periferias y alcanzan valores de hasta 31,6°C en el centro urbano, generando un efecto de isla de calor.

La calidad ambiental muestra un patrón de mejora hacia las periferias, donde más del 47% del territorio exhibe condiciones ambientales "Excelentes" debido a la abundancia de vegetación. En contraste, menos del 1% del área urbana presenta calidad "Muy mala", principalmente en el centro urbano densamente poblado.

Por otro lado, los contaminantes atmosféricos muestran una distribución espacial diferenciada. Según el mapa presentado en los resultados, el monóxido de carbono (CO) se concentra principalmente hacia el oeste de la ciudad, mientras que el dióxido de azufre (SO₂), tienen su mayor presencia en el área urbana debido al tráfico vehicular y las actividades comerciales, afectando la salud pública y exacerbando problemas ambientales. Las

periferias, con una menor densidad de población y mayor cobertura vegetal, registran concentraciones significativamente menores de estos contaminantes.

Este estudio, apoyado en el uso de sensores remotos, se centra en analizar las dinámicas ambientales y urbanas de Nueva Loja, destacando su utilidad como herramienta para evaluar variables como densidad de vegetación, construcciones, temperatura superficial y contaminación atmosférica. Mediante un análisis por clústeres, se identificaron diferencias significativas entre las zonas de la ciudad, permitiendo clasificar áreas según su nivel de urbanización y calidad ambiental. Además, los clústeres facilitaron la zonificación en función de características ambientales y socioeconómicas, proporcionando un marco de referencia para futuras investigaciones y estrategias de planificación.

Otro aspecto relevante es que esta metodología se basa en imágenes satelitales de acceso libre, como Sentinel y Landsat, que permiten actualizaciones frecuentes cada 10 a 16 días, lo que la convierte en una herramienta de bajo costo con un alto potencial de monitoreo continuo. Los resultados subrayan la importancia de estas metodologías para comprender la interacción entre las actividades humanas y el entorno. Estos hallazgos aportan información clave para formular políticas públicas y planificar estrategias sostenibles orientadas al desarrollo urbano sostenible.

Recomendaciones

En conclusión, este estudio resalta la necesidad de implementar estrategias integrales para un desarrollo urbano sostenible en Nueva Loja. Se recomienda priorizar la conservación y expansión de espacios verdes, como parques y corredores ecológicos, para mejorar la calidad del aire, reducir las temperaturas y promover el bienestar de la comunidad. Es crucial también una planificación territorial equilibrada mediante el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT), con zonificaciones claras para áreas residenciales, comerciales, agrícolas y de conservación.

Además, se debe fomentar la construcción sostenible, utilizando materiales ecológicos y diseñando edificaciones energéticamente eficientes. El uso de sensores remotos para monitorear la vegetación, temperatura y calidad del aire resultará útil en este proceso, junto con el análisis de clústeres para adaptar las intervenciones a las características específicas de cada zona.

Es importante involucrar a la ciudadanía en proyectos de restauración ambiental y promover campañas educativas sobre la conservación del medio ambiente. También se deben mejorar los sistemas de transporte público sostenible, como ciclovías y transporte colectivo eficiente, y controlar las emisiones contaminantes para mitigar los efectos negativos del crecimiento urbano. Estas medidas contribuirán a una gestión más sostenible y a una mejor calidad de vida para los habitantes de Nueva Loja.

Referencias

- Abramo, P., Mancilla, M. R., & Espinoza, J. E. (2016). Procesos urbanos en acción
¿Desarrollo de ciudades para todos?
- Acioly, C., Vignol, R., & Jonsson, A. (2020). La Nueva Agenda Urbana.
- Asamblea Nacional del Ecuador. (2017). Ley Orgánica de Defensa del Ambiente. Recuperado
de <https://www.asambleanacional.gob.ec>
- Centers for Disease Control and Prevention (CDC). (2021). Carbon monoxide poisoning.
<https://www.cdc.gov/co>
- Chen, X., Wang, Z., & Zhang, Z. (2016). *Urban expansion and land use change monitoring
using remote sensing data and spatial metrics*. Journal of Environmental Management,
181, 131-142. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.05.057>
- CRMexico. (2024). Desafíos Actuales en la Planificación Urbana y Ambiental. Recuperado
de <https://crmexico.mx/desafios-actuales-en-la-planificacion-urbana-y-ambiental/>
- CursosTeledeteccion.com. (2019). *NDVI, ¿qué es y para qué sirve?* Recuperado de
<https://www.cursosteledeteccion.com/ndvi-que-es-y-para-que-sirve/>
- Domínguez, J. (2022). *Análisis de la cobertura vegetal en áreas urbanas mediante imágenes
satelitales*. Recuperado de
<https://dominiodelasciencias.com/ojs/index.php/es/article/view/3248>
- El Telégrafo*. (2023, 21 de septiembre). Censo 2022: Ya somos 16,938,986 que vivimos en el
Ecuador. *El Telégrafo*. Recuperado de
<https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/nacionales/44/censo-2022-ya-somos-16-938-986-de-ecuatorianos>
- Environmental Protection Agency (EPA). (2019). Sulfur dioxide (SO₂) pollution.
<https://www.epa.gov/so2-pollution>
- European Environment Agency. (2020). Environmental noise in Europe — 2020. Recuperado
de <https://www.eea.europa.eu/publications/environmental-noise-in-europe>
- GAD Municipal de Nueva Loja. (2022). Análisis de la lluvia ácida en la ciudad de Nueva Loja,
provincia de Sucumbíos. Recuperado de

https://www.researchgate.net/publication/357258091_Analisis_de_Iluvia_acida_en_la_ciudad_de_Nueva_Loja_provincia_de_Sucumbios

Gobierno Autónomo Descentralizado (GAD) Municipal de Nueva Loja. (2021). Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT) y Plan de Uso y Gestión del Suelo (PUGS). Recuperado de <https://lagoagrio.gob.ec/alcaldia/files/descargas/PDOT/PDOT-y-plan-uso-gestion-suelo-PUGS.pdf>

Gobierno Autónomo Descentralizado (GAD) Municipal de Nueva Loja. (2021). Planes de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT) de Nueva Loja. Recuperado de <https://lagoagrio.gob.ec/alcaldia/files/descargas/PDOT/PDOT-y-plan-uso-gestion-suelo-PUGS.pdf>

Gobierno Autónomo Descentralizado (GAD) Municipal de Nueva Loja. (2021). *Determinación de los efectos ambientales provocados por la contaminación de vertidos y descargas de aceites, grasas y lubricantes provenientes de las lubricadoras*. Recuperado de https://dspace.unl.edu.ec/jspui/handle/123456789/6/browse?etal=30&null=&offset=473&order=ASC&rpp=50&sort_by=1&type=title

González, A., Martínez, F., & Pérez, J. (2022). *Impactos de la contaminación del aire en la salud urbana de la Amazonía ecuatoriana: el caso de Nueva Loja*. *Revista Ecuatoriana de Salud Pública*, 36(2), 120-135.

Grande Ayala, C. E. (2024). *Sostenibilidad social en la movilidad urbana y su impacto en la mejora del hábitat: Aportes desde las capitales del Triángulo Norte Centroamericano* (Tesis doctoral). Universidad Loyola Andalucía. Recuperado de <https://repositorio.uloyola.es/handle/20.500.12412/6204>

Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). (2023). *Indicadores ambientales y urbanos en el Ecuador*. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec>

- INEC. (2024). NEC ESTIMA QUE, SEGÚN PROYECCIONES EN EL MEDIANO PLAZO, ECUADOR TENDRÁ MÁS ADULTOS MAYORES, MENOS NIÑOS Y ADOLESCENTES EN 2050. Quito.
- Jiménez-López, J. M., & Ruiz-Luna, A. (2021). Evaluación de la pérdida de áreas verdes urbanas mediante análisis multitemporal de imágenes satelitales. *Revista de Geografía Aplicada*, 12(3), 45-60.
- Jordán, R., Rifo, L., & Prado, A. (2017). *Desarrollo sostenible, urbanización y desigualdad en América Latina y el Caribe*. Santiago.
- Loor, V., & Ramos, R. (2021). PDOT DEL CANTÓN LAGO AGRIO.
- Martínez, F., & Pérez, J. (2021). *Costos económicos de las enfermedades respiratorias por contaminación del aire en ciudades ecuatorianas*. *Revista de Economía y Salud*, 29(1), 45-56.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia. (s.f.). Política de Gestión Ambiental Urbana. Recuperado de <https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/politica-de-gestion-ambiental-urbana/>
- Miranda, A. A. (2019). *Desarrollo de la Teledetección en Ecuador*.
- NASA Applied Sciences. (2023). Monitoreo de la Calidad del Agua de Lagos Interiores Usando Teledetección. Recuperado de https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/2023-08/WaterQuality_Part1_Esp.pdf
- Organización Mundial de la Salud. (2021). Global air quality guidelines. Recuperado de <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>
- Plan de Ordenamiento Territorial del Cantón Lago Agrio (PDOT). (2020). *Diagnóstico ambiental y planificación estratégica del cantón Lago Agrio*. Gobierno Autónomo Descentralizado del Cantón Lago Agrio.
- PDOT. (2023). Guía para la formulación/actualización de Planes de Desarrollo y Ordenamiento Territorial - PDOT. Obtenido de <https://www.planificacion.gob.ec/wp-content/uploads/2023/06/PDOT-ACUERDO-Nro.-SNP-SNP-2023-0049-A.pdf>

Perevochtchikova, M. (2013). La evaluación del impacto ambiental y la importancia de los indicadores ambientales.

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [PNUMA]. (2021, julio 27). *Compostar puede ayudarnos a reducir nuestro impacto en el planeta*. United Nations Environment Programme. <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/compostar-puede-ayudarnos-reducir-nuestro-impacto-en-el-planeta>

Pugh, C. (2020). *Sustainable Cities in Developing Countries*. Routledge.

Ramírez, L. (2024, October 30). Algoritmo k-means: ¿Qué es y cómo funciona? <https://www.iebschool.com/blog/algoritmo-k-means-que-es-y-como-funciona-big-data/>

Riveira, I. S., & Maseda, R. C. (n.d.). *Evaluación de metodos para la obtención de mapas continuos de aptitud para usos agroforestales*. www.geo-focus.org

Röbbel, N. (2016). *Los espacios verdes: un recurso indispensable para lograr una salud sostenible en las zonas urbanas*. Naciones Unidas. <https://www.un.org/es/chronicle/article/los-espacios-verdes-un-recurso-indispensable-para-lograr-una-salud-sostenible-en-las-zonas-urbanas>

Santamouris, M. (2014). *Cooling the cities – A review of innovative technologies and strategies*. *Energy and Buildings*, 82, 138-149. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.038>

Santamouris, M. (2014). *Cooling the cities: A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments*. *Solar Energy*, 103, 682-703. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.003>

Santé, I., & Crecente, R. (2014). Evaluación de métodos para la obtención de mapas continuos de aptitud para usos agroforestales. *GeoFocus. International Review of Geographical Information Science and Technology*, (5), 40–68. <https://www.geofocus.org/index.php/geofocus/article/view/58>

- Tzoulas, K., Korpela, K., Venn, S., Yli-Pelkonen, V., Kaźmierczak, A., & Niemelä, J. (2007). Promoting ecosystem and human health in urban areas using green infrastructure: A literature review. *Landscape and Urban Planning*, 81(3), 167-178. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.02.001>
- United Nations. (2022). Sustainable development goals: Urban sustainability. Recuperado de <https://sdgs.un.org/goals>
- USAID. (2023). *Mesa Ambiental Provincial de Sucumbíos: Identificación de problemas ambientales en Nueva Loja*. Recuperado de https://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PA00M9X9.pdf
- WeAdapt. (2024). *Fortalecimiento del Monitoreo Socioambiental Integrado en los Andes*. Recuperado de https://weadapt.org/wp-content/uploads/2024/08/Documento-sintesis-regional-Monitoreo-socioambiental-integrado_FINAL_compressed-1.pdf
- World Bank. (2021). What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Recuperado de <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317>
- World Health Organization (WHO). (2020). Air pollution and health. <https://www.who.int/health-topics/air-pollution>
- Yengoh, G. T., Di Gregorio, A., & Tichit, M. (2015). *Urban vegetation and its impact on human well-being*. *Urban Forestry & Urban Greening*, 14(4), 773-783. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.07.005>
- Yengoh, G. T., Dent, D., Olsson, L., Tengberg, A. E., & Tucker, C. J. (2015). *Use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Assess Land Degradation at Multiple Scales: Current Status, Future Trends, and Practical Considerations*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-24112-8>
- Yilmaz, G., Doğan, E., & Güneş, M. (2019). *The impact of urbanization on the environmental quality of cities: A case study in Turkey*. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(5), 1-14. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7481-x>

Zhao, Q., Wang, J., & Li, H. (2022). Remote sensing applications in urban environmental quality: A systematic review. *International Journal of Environmental Science*, 39(5), 112-126.