



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
AMBIENTALES
CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES
RENOVABLES

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL DE LA LLUVIA ÁCIDA EN EL
CANTÓN IBARRA, PROVINCIA DE IMBABURA

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniera en Recursos
Naturales Renovables

AUTORAS:

TATIANA KATHERINE ESTÉVEZ HIDALGO
ELSA MARISOL QUILUMBANGO PANAMÁ

DIRECTOR:

ING. JAIRO SANTIAGO CABRERA GARCÍA MSc.

Ibarra-Ecuador 2025

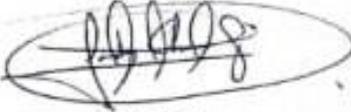
UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
AMBIENTALES CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES
RENOVABLES

ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL DE LA LUVIA ÁCIDA EN EL CANTÓN
IBARRA, PROVINCIA DE IMBABURA

Trabajo de titulación revisada por el Comité Asesor, previa a la obtención del Título de:

INGENIERA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES
APROBADA:

Ing. Jairo Santiago Cabrera García MSc.
DIRECTOR



FIRMA

PhD. Jorge Renato Oquendo Andino
ASESOR



FIRMA

IBARRA-ECUADOR
AGOSTO, 2025

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN
A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hacemos la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual ponemos a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO		
CÉDULA DE IDENTIDAD	1004246417	
APELLIDOS Y NOMBRES	Quilumbango Panamá Elsa Marisol	
DIRECCIÓN:	Otavalo – Imbabura	
EMAIL:	elsaquilum963@gmail.com	
TELÉFONO FIJO:	TELÉFONO MÓVIL:	0985853965

DATOS DE CONTACTO		
CÉDULA DE IDENTIDAD	1004565352	
APELLIDOS Y NOMBRES	Estévez Hidalgo Tatiana Katherine	
DIRECCIÓN:	Ibarra- Imbabura	
EMAIL:	tatii98eh@gmail.com	
TELÉFONO FIJO:	TELÉFONO MÓVIL:	0978809208

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL DE LA LLUVIA ÁCIDA EN EL CANTÓN IBARRA, PROVINCIA DE IMBABURA
AUTORA:	Quilumbango Panamá Elsa Marisol Estévez Hidalgo Tatiana Katherine
FECHA:	5 de agosto del 2025
PROGRAMA:	PREGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniera en Recursos Naturales Renovables
DIRECTORA:	Ing. Jairo Santiago Cabrera García MSc.

2. CONSTANCIAS

La autora manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y son titulares de los derechos patrimoniales, por lo que asumimos la responsabilidad sobre el contenido de esta y saldremos en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 5 días del mes de agosto de 2025

LOS AUTORES:



Quilumbango Panamá Elsa Marisol

C.I. 1004246417



Estévez-Hidalgo Tatiana Katherine

C.I. 1004565352

REGISTRO BIBLIOGRÁFICO

Guía: FICAYA-UTN

Fecha: 5 de Agosto de 2025

ESTÉVEZ HIDALGO TATIANA KATHERINE

QUILUMBANGO PANAMÁ ELSA MARISOL

ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL DE LA LLUVIA ÁCIDA EN EL CANTÓN IBARRA, PROVINCIA DE IMBABURA

TRABAJO DE GRADO

Ingeniería en Recursos Naturales Renovables, Universidad Técnica del Norte. Carrera de Ingeniería en Recursos Naturales Renovables, Ibarra, 5 de agosto de 2025.

DIRECTOR: Ing. Jairo Santiago Cabrera García MSc.

El objetivo de esta investigación fue analizar espacio-temporalmente la presencia de lluvia ácida en el cantón Ibarra, mediante la evaluación de parámetros fisicoquímicos como el pH, la conductividad eléctrica y los sólidos totales en distintas zonas (urbana, periurbana y rural). A partir de los resultados obtenidos, se concluyó que las precipitaciones presentaron niveles cercanos a la neutralidad, sin evidencias de acidez significativa. Sin embargo, se identificó la influencia de factores antrópicos en la variación de estos parámetros, resaltando la importancia de implementar un sistema de monitoreo continuo para preservar la calidad ambiental y prevenir posibles procesos de acidificación atmosférica.

Ibarra, 5 de agosto de 2025

AUTORES

Quilumbango Panama Elsa Marisol

C.I. 1004246417

Estévez Hidalgo Tatiana Katherine

C.I. 1004565352

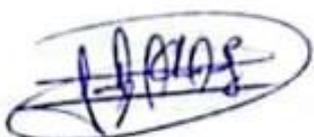
DIRECTOR

Ing. Jairo Santiago Cabrera García MSc.

C.I. 1003315312

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por las señoritas ESTÉVEZ HIDALGO TATIANA KATHERINE, con cédula de identidad Nro. 100456535-2 y QUILUMBANGO PANAMÁ ELSA MARISOL, con cédula de identidad Nro. 100424641-7, bajo mi supervisión en calidad de director.



Ing. Jairo Santiago Cabrera García MSc.

DIRECTOR

Ibarra a los 5 días del mes de agosto de 2025

AGRADECIMIENTO

Queremos agradecer de manera muy especial a nuestra familia, por ser el pilar fundamental que nos ha sostenido durante todo este proceso. Su amor, apoyo incondicional y fortaleza han sido clave para que hoy podamos culminar esta etapa tan importante nuestra vida.

Extendemos nuestra gratitud a nuestros docentes, en especial al MSc. Santiago Cabrera, por su guía, confianza y dedicación como tutor, por su valiosa asesoría y constante acompañamiento académico. Sus enseñanzas han dejado una huella significativa en nuestra formación profesional.

También agradecemos a nuestros amigos y a toda nuestra familia en general, por cada palabra de aliento, por los abrazos en silencio, por la comprensión en los momentos difíciles y por ser parte esencial de este camino. Gracias por darnos fuerza cuando más lo necesitamos.

Este trabajo es el reflejo de cada gesto de apoyo, cada consejo y cada sacrificio compartido. A todos ustedes, gracias de corazón.

Tatiana Estévez, Elsa Quilumbango

DEDICATORIA

A mis padres, Marco Estévez y Margot Hidalgo, pilares inquebrantables de mi vida. Gracias por su amor incondicional, por creer en mí incluso en los momentos más difíciles y por no rendirse nunca, aun cuando el camino parecía incierto. Han sido mi fuerza, mi refugio y mi inspiración. Esta meta también es suya.

A mi hermano, Juan Carlos, mi ejemplo silencioso pero firme. Gracias por enseñarme que los sueños se alcanzan con esfuerzo y convicción. Siempre he querido ser como tú: grande, admirable y auténtico. Gracias por marcar el camino con tu luz.

A mi compañero de vida, Christopher, con quien comparto no solo estos 9 años de amor, sino también cada lucha, cada logro, cada caída y cada vuelo. Gracias por caminar a mi lado, impulsarme a ser mejor y nunca dejarme sola en la búsqueda de mis sueños.

Y a ti, Misi, mi fiel compañera de madrugadas, apuntes y desvelos. Tu compañía silenciosa, tus maullidos a destiempo y tu ternura infinita hicieron que los días más pesados fueran más suaves. No tengo dudas: hasta una gata puede ser parte esencial de una carrera.

Este trabajo está dedicado a ustedes, porque sin su amor, su compañía y su ejemplo, este sueño no habría sido posible.

Con todo mi corazón,

Tatiana Estévez

DEDICATORIA

A mis padres, Eloisa Panamá y Enrique Muenala por su amor incondicional, por su confianza y por ser mi mayor apoyo en cada paso de este camino. Gracias por estar siempre presentes en todos los momentos de mi vida y nunca dejarme sola.

A mis hermanas, Blanca Quilumbango y Daisy Muenala por estar siempre a mi lado y apoyarme en cada momento. Por su buena disposición a ayudarme en lo que necesitaba, aportando su granito de arena para que hoy pueda cumplir esta meta.

A mis amigas Anahí, Sol y Melanie, quienes han estado conmigo desde el primer semestre hasta el último día de esta etapa. Por ser mi compañía constante, por cada momento compartido y por todo lo que aprendí a su lado, dejándome valiosas lecciones y recuerdos que llevaré siempre conmigo: las risas interminables, los chistes que solo nosotras entendíamos y el consuelo que encontré en ustedes cuando más lo necesitaba. Por cuidarme y acompañarme tanto durante estos años.

A aquellos amigos que llegaron después Carolina y Diego, con quienes el tiempo y las circunstancias pusieron en mi camino en los últimos semestres. Por sus consejos sinceros, por cada broma, cada risa compartida por todos esos momentos que hicieron que el final de esta etapa fuera aún más valioso.

Elsa Quilumbango

Índice

RESUMEN.....	16
INTRODUCCIÓN	18
1.1. Revisión de antecedentes o estado del arte	18
1.2. Objetivos	21
1.2.1. <i>Objetivo general.....</i>	<i>21</i>
1.2.2. <i>Objetivos específicos.....</i>	<i>21</i>
1.3. Pregunta(s) directriz (ces) de la investigación	21
1.4. Hipótesis.....	21
MARCO TEÓRICO	22
2.1. Patrones Climáticos en Zonas Tropicales Andinas.....	22
2.1.1. <i>Climatología, Formación de la Lluvia y Patrones de Precipitación.....</i>	<i>22</i>
2.2. La Evolución de la Lluvia Ácida Desde la Revolución Industrial.....	22
2.2.1. <i>Formación de la Lluvia Ácida.....</i>	<i>23</i>
2.2.2. <i>Efectos en Ecosistemas Acuáticos y Terrestres</i>	<i>24</i>
2.2.3. <i>Efectos en la agricultura y ganadería.....</i>	<i>25</i>
2.2.4. <i>Impactos en la salud humana.....</i>	<i>25</i>
2.3. Análisis Espacio-Temporal de la Lluvia Ácida	26
2.3.1. <i>Origen y Evolución del Análisis Espacio-Temporal para las Ciencias Ambientales.....</i>	<i>26</i>
2.3.2. <i>Monitoreo Espacio-Temporal de la Lluvia Ácida.....</i>	<i>26</i>
2.3.3. <i>Instrumentos de Medición.....</i>	<i>27</i>
2.3.4. <i>Herramientas Utilizadas: Estadística Multivariada y Sistemas de Información Geográfica (SIG).....</i>	<i>28</i>
2.4. Marco legal.....	28
2.4.1. <i>Constitución de la República de Ecuador.....</i>	<i>28</i>
2.4.2. <i>Tratados y Convenios Internacionales.....</i>	<i>29</i>
2.4.3. Código Orgánico del Ambiente (CODA)	29
2.4.4. Acuerdo Ministerial Nro. 097-A	29

2.4.4. Código Orgánico Integral Penal (COIP)	29
2.4.5. Objetivos del Desarrollo Sostenible.....	30
2.4.6. Planes y Políticas Nacionales	30
2.4.7. Ordenanzas Locales	30
CAPITULO III.....	31
METODOLOGÍA	31
3.1 Descripción del Área de Estudio.....	31
3.2 Recolección de Datos	32
3.2.1 Datos Meteorológicos	32
3.2.2. Datos Geoespaciales.....	33
3.3 Muestras de Lluvia.....	34
3.4 Análisis de Laboratorio	35
3.4.1. pH y Conductividad.....	35
3.4.2. Sólidos Suspendidos Totales y Sólidos Totales.....	35
3.5 Análisis Espacio-Temporal	36
3.6 Validación y Verificación	36
3.7 Materiales y equipos	37
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	38
4.1 Caracterización físico-química de las precipitaciones	38
4.1.1 pH y conductividad	38
4.1.2 Dinámica atmosférica en la variación del pH y la conductividad.....	40
4.1.3 Detección de niveles de sulfatos (SO _x) y nitratos (NO _x) en las muestras recolectadas	42
4.2 Distribución espacio-temporal de la lluvia ácida.....	42
4.2.1 Análisis espacio-temporal del pH y su variación en las zonas de estudio ..	42
4.2.2 Análisis de los sólidos totales en las zonas de muestreo	47
4.2.3 Distribución de sólidos disueltos de acuerdo con los meses de estudio.....	52
4.2.4 Validación de Datos en Condiciones de Precipitación.....	53
4.3 Propuesta de estrategias de monitoreo continuo y mantenimiento de niveles ..	55

<i>4.3.1 Implementación de un Sistema de Monitoreo Permanente.....</i>	<i>55</i>
<i>4.3.2 Fortalecimiento de capacidades institucionales para la gestión de calidad del aire</i>	<i>57</i>
CAPÍTULO V.....	58
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	58
5.1 Conclusiones.....	58
5.2 Recomendaciones.....	59
BIBLIOGRAFÍA.....	60
ANEXOS.....	63
Anexo 1.....	63
Anexo 2.....	63
Anexo 3.....	65
Anexo 4.....	66
Anexo 5.....	67
Anexo 6.....	68
Anexo 7.....	69
Anexo 8.....	73
Anexo 9.....	77
Anexo 10.....	78

Índice de gráficos

Figura 1 Lluvia ácida evolución desde la revolución industrial	24
Figura 2 Mapa de la zona urbana, periurbana y rural del cantón Ibarra, provincia de Imbabura.....	31
Figura 3 Diagrama ombrotérmico del cantón Ibarra.....	32
Figura 4 Mapa de isoyetas del cantón Ibarra	33
Figura 5 Mapa de puntos de muestro en las zonas urbana, periurbana y rural	34
Figura 6 Variación estacional del pH y conductividad eléctrica en el cantón Ibarra de la lluvia ácida.....	41
Figura 7 Mapa del potencial hidrógeno (pH) en el mes de noviembre del agua lluvia	42
Figura 8 Mapa del potencial hidrógeno (pH) en el mes de diciembre del agua lluvia	43
Figura 9 Mapa del potencial hidrógeno (pH) en el mes de febrero del agua lluvia.....	46
Figura 10 Mapa de distribución de sólidos totales del mes de noviembre	47
Figura 11 Mapa de distribución de sólidos totales del mes de diciembre	48
Figura 12 Mapa de distribución de sólidos totales del mes de enero.....	50
Figura 13 Mapa de distribución de sólidos totales del mes de febrero	51
Figura 14 Variación mensual de los sólidos disueltos por zonas en el cantón Ibarra por agua lluvia.....	53

Índice de tablas

Tabla 1 Materiales y equipos en la investigación	37
Tabla 2 Promedios de pH y conductividad en el mes de noviembre	38
Tabla 3 Promedios de pH y conductividad en el mes de diciembre	38
Tabla 4 Promedios de pH y conductividad en el mes de enero.....	39
Tabla 5 Promedios de pH y conductividad en el mes de febrero	39

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
AMBIENTALES
CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL DE LA LLUVIA ÁCIDA EN EL CANTÓN
IBARRA, PROVINCIA DE IMBABURA

Estévez Hidalgo Tatiana Katherine
Quilumbango Panamá Elsa Marisol

RESUMEN

El presente estudio analiza la distribución espacio-temporal de la lluvia ácida en el cantón Ibarra, provincia de Imbabura, con un enfoque en sus impactos ambientales y sociales. Se realizó una evaluación exhaustiva utilizando técnicas de laboratorio para medir el pH, la conductividad y la composición química de las precipitaciones, junto con herramientas de sistemas de información geográfica para mapear patrones de afectación. Los resultados revelan una clara variación entre la actividad humana y la acidez de las lluvias, destacándose áreas urbanas como las más afectadas. Además, se identificaron diferencias estacionales en los niveles de contaminación, siendo más pronunciadas durante los periodos de mayor actividad vehicular e industrial. A partir de estos hallazgos, se propone la implementación de un sistema de monitoreo continuo que permita identificar variaciones en el tiempo real, así como estrategias de mitigación enfocadas en reducir emisiones contaminantes y promover prácticas sostenibles en la región. Este trabajo no solo aporta datos fundamentales sobre la calidad ambiental en el cantón Ibarra, sino que también resalta la importancia de abordar el fenómeno de la lluvia ácida desde una perspectiva integral para proteger los recursos naturales y la salud pública.

Palabras clave: Análisis espacio-temporal, calidad ambiental, impacto ambiental, lluvia ácida, sistemas de información geográfica.

ABSTRACT

Abstract This study analyzes the spatiotemporal distribution of acid rain in the canton of Ibarra, Imbabura province, focusing on its environmental and social impacts. An exhaustive evaluation was conducted using laboratory techniques to measure the pH, conductivity, and chemical composition of the precipitation, along with geographic information systems tools to map patterns of impact. The results reveal a clear variation between human activity and the acidity of the rain, with urban areas being the most affected. Additionally, seasonal differences in pollution levels were identified, being more pronounced during periods of increased vehicular and industrial activity. Based on these findings, the implementation of a continuous monitoring system is proposed to identify real-time variations, as well as mitigation strategies aimed at reducing pollutant emissions and promoting sustainable practices in the region. This work not only provides fundamental data on environmental quality in the canton of Ibarra but also emphasizes the importance of addressing the phenomenon of acid rain from a comprehensive perspective to protect natural resources and public health.

Keywords: Spatiotemporal analysis, environmental quality, environmental impact, acid rain, geographic information systems.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Revisión de antecedentes o estado del arte

La contaminación atmosférica se sitúa en la Revolución Industrial, periodo en el cual la combustión masiva de carbón liberó grandes cantidades de dióxido de azufre y otros contaminantes en la atmósfera (Burns et al., 2016). Los principales tipos de contaminación incluyen material particulado, contaminantes químicos y biológicos. Entre los contaminantes más prevalentes se encuentran el dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), compuestos orgánicos volátiles (COVs) y partículas finas (PM10 y PM2.5) (Aimacaña, 2016). Estos agentes contaminantes son responsables de patologías respiratorias y cardiovasculares, además de impactos negativos en el ambiente como la lluvia ácida y el cambio climático (Chen et al., 2021).

La lluvia ácida ha sido objeto de estudio durante décadas debido al impacto que genera en los ecosistemas naturales y la salud humana. Este fenómeno atmosférico se origina a partir de la liberación de gases contaminantes, como el dióxido de azufre (SO_2) y los óxidos de nitrógeno (NO_x), principalmente por actividades industriales y la quema de combustibles fósiles (Aguilar et al., 2016). Estos gases, al reaccionar con el oxígeno y la humedad en la atmósfera, forman ácido sulfúrico (H_2SO_4) y ácido nítrico (HNO_3), mismos que son transportados por las corrientes de aire y precipitados en forma de lluvia, nieve, niebla o rocío. Este proceso presenta efectos devastadores en la calidad del aire, suelos, cuerpos de agua y vegetación, que provoca pérdida de la biodiversidad y productividad agrícola (Bravo et al., 2003).

Este fenómeno se representa como un desafío medioambiental que está impactando a nivel mundial, generando problemas en la salud pública, el medio ambiente, en la sociedad y la economía (Granados et al., 2010). Ejemplos históricos como el de Sudbury, Ontario-Canadá, resalta el efecto perjudicial de la lluvia ácida derivada de la actividad industrial, con consecuencias trágicas en la vegetación, los recursos hídricos y la calidad del suelo. En Europa, se evidencia la acidificación del suelo y la desaparición de especies acuáticas. Mientras en los países nórdicos se muestra una vulnerabilidad acentuada debido a la baja capacidad de amortiguamiento del suelo frente a la acidez (Garcés & Hernández, 2004).

En Ecuador, la principal causa de la lluvia ácida es la quema de combustibles fósiles (Fierro, 2010). Un estudio realizado en la ciudad de Nueva Loja, provincia de Sucumbíos mostró que la mayoría de las precipitaciones presentan un pH entre 4.81 y 6.45, indicando una ligera acidez. La conductividad variable del agua de lluvia sugiere bajos niveles de contaminantes ionizados en el aire. Estos resultados destacan la necesidad de monitoreo continuo para mitigar los impactos ambientales y proteger los ecosistemas locales (Carrera et al., 2021).

En el Cantón Ibarra, el crecimiento poblacional ha llevado a un aumento de la actividad industrial y del tráfico vehicular, generando preocupaciones sobre la calidad del aire y su posible contribución a fenómenos vinculados con la lluvia ácida (Pabón, 2010). Si bien, un informe de la Organización Mundial de la Salud indica que Ibarra es una de las ciudades con aire más limpio en Ecuador (Ministerio del Ambiente Agua y Transición Ecológica, 2017), las emisiones de gases de combustión de fuentes fijas y móviles siguen siendo preocupantes. Es esencial evaluar el impacto específico de la lluvia ácida en esta área para comprender cómo las actividades humanas afectan el medio ambiente local (Chaves-Solano et al., 2021).

La creciente actividad industrial y vehicular ha incrementado las emisiones de los contaminantes (SO_2 y NO_x), lo que sugiere una preocupante tendencia hacia la acidificación de las precipitaciones (Anrango, 2019). Este fenómeno tiene graves consecuencias sobre la calidad del agua, la fertilidad del suelo y la salud de los ecosistemas acuáticos y terrestres. Estudios realizados en Quito han demostrado que aproximadamente el 50% de la superficie de la ciudad está afectada por lluvia ácida, con un pH menor a 5.6, lo cual indica una contaminación significativa por óxidos de azufre y nitrógeno provenientes de plantas termoeléctricas y del tráfico vehicular (Flores & Bonilla, 2010).

La experiencia en otras regiones, como en Nueva Loja y Guayaquil, ha demostrado que los altos niveles de SO_2 y NO_x en la atmósfera resultan en la formación de ácidos fuertes que precipitan y causan daños a largo plazo (Carrera et al., 2021). En el Cantón Ibarra, la acidificación del suelo puede llevar a la pérdida de nutrientes esenciales como el calcio y el magnesio, afectando la productividad agrícola, una de las principales actividades económicas de la región (Flores & Bonilla, 2010). Además, la lluvia ácida contribuye al deterioro de infraestructuras y edificaciones históricas, acelerando su corrosión y aumentando los costos de mantenimiento y reparación (Granados et al., 2010).

La problemática de la contaminación en Ibarra no solo afecta al medio ambiente, sino también a la salud pública. La inhalación de partículas ácidas puede causar problemas respiratorios y agravar enfermedades preexistentes, especialmente en niños y personas mayores. Además, este fenómeno puede liberar metales tóxicos del suelo, como el aluminio, que son perjudiciales para la flora y fauna (Granados et al., 2010). Se ha observado que puede llevar a la defoliación de plantas y la acidificación de cuerpos de agua, afectando la biodiversidad y la cadena alimentaria (Garcés & Hernández, 2004).

La gestión de la calidad del aire y la mitigación de los efectos ambientales en el cantón requieren una estrategia integral que incluya la monitorización constante de los niveles de pH en las precipitaciones, la identificación de las principales fuentes de emisión de contaminantes y la implementación de políticas ambientales (Fierro, 2010). Es crucial involucrar a la comunidad y a las autoridades locales en la educación y concienciación sobre los impactos de la contaminación atmosférica y las medidas preventivas que pueden adoptarse para reducir las emisiones de contaminantes (Flores & Bonilla, 2010).

La investigación sobre la presencia de lluvia ácida es vital debido a sus efectos perjudiciales en el medio ambiente y la salud pública. Este fenómeno, causado por la emisión de gases contaminantes a la atmósfera, puede servir como un indicador crucial de los niveles de contaminación ambiental que afectan a la región. Sus impactos incluyen la acidificación del suelo y del agua, lo que afecta adversamente la biodiversidad, los cultivos y los recursos hídricos (Carrera et al., 2021). Estos cambios comprometen la sostenibilidad ecológica y la seguridad alimentaria de la región, así como la salud de sus habitantes, quienes pueden sufrir enfermedades respiratorias y otros problemas de salud debido a la exposición (Granados et al., 2010).

La lucha contra la lluvia ácida es crucial para proteger la biodiversidad, los suelos y los recursos hídricos, promoviendo un desarrollo sostenible y resiliente (Fierro, 2010). Además, esta investigación se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente con el ODS 13 (Acción por el Clima) y el ODS 15 (Vida de Ecosistemas Terrestres), que enfatizan la necesidad de combatir el cambio climático y gestionar sosteniblemente los ecosistemas terrestres (Organización de las Naciones Unidas, 2022).

El Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT) del Cantón Ibarra también refleja estos principios, incluyendo estrategias específicas para la gestión sostenible del medio ambiente y la mitigación de impactos ambientales negativos (Plan De Desarrollo Y Ordenamiento Territorial del Cantón Ibarra, 2023). La investigación sobre la lluvia ácida en Ibarra aportará datos cruciales que fortalecerán la implementación de estas políticas y ayudarán a cumplir con los objetivos nacionales de desarrollo sostenible.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

- Analizar espacio-temporalmente la lluvia ácida en el cantón Ibarra, Provincia de Imbabura

1.2.2. Objetivos específicos

- Analizar la acidez y conductividad de las precipitaciones en diferentes puntos del Cantón Ibarra.
- Determinar la distribución espacio-temporal de la acidez de la lluvia mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para localizar las áreas más afectadas y tendencias estacionales.
- Proponer un plan de monitoreo continuo y de bajo costo como medio de seguimiento en los puntos de acción inmediata en el cantón Ibarra.

1.3. Pregunta(s) directriz (ces) de la investigación

- ¿Cuáles son las principales diferencias en el grado de urbanización que pueden influenciar en la lluvia y la acidez?
- ¿Qué relación tiene la acidez de las precipitaciones en comparación con los niveles de lluvia, conductividad y el grado de urbanismo en la ciudad de Ibarra?
- ¿Cuáles son los patrones espacio-temporales en la acidez de las precipitaciones a lo largo del periodo de estudio?

1.4. Hipótesis

El gradiente urbano y la estacionalidad influyen significativamente en la acidez y otras características fisicoquímicas de las lluvias en la ciudad de Ibarra y sus alrededores.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Patrones Climáticos en Zonas Tropicales Andinas

Las regiones tropicales andinas, definidas por su topografía compleja y clima variado, enfrentan desafíos significativos debido a las alteraciones en los patrones de precipitación. Estas modificaciones impactan la agricultura, los recursos hídricos y los ecosistemas locales (Scheiber et al., 2015). Las fluctuaciones en la temperatura y la humedad afectan los ciclos biológicos de la flora y fauna, alterando la biodiversidad regional (Chen et al., 2021). Además, las variaciones climáticas pueden intensificar fenómenos extremos como sequías e inundaciones, afectando directamente la estabilidad socioeconómica de las comunidades andinas (Sosa-Echeverría et al., 2018). Duque, (2020) subraya la vulnerabilidad de estos ecosistemas ante el calentamiento global y la deforestación, lo que intensifica los problemas hidrogeológicos y socioambientales.

2.1.1. Climatología, Formación de la Lluvia y Patrones de Precipitación

Los patrones de precipitación en esta región están influenciados por factores climáticos como los vientos alisios, la topografía y fenómenos como El Niño y La Niña. Estos factores resultan en una distribución irregular de las lluvias, con las vertientes orientales de los Andes recibiendo más precipitación que las occidentales (Duque, 2020). La lluvia convectiva, asociada con nubes cumuliformes, es típica de los meses cálidos, mientras que la lluvia estratiforme, generada por la convergencia de aire en áreas de baja presión, es más frecuente en meses fríos. Además, la lluvia orográfica ocurre cuando el aire húmedo se eleva sobre las montañas, se enfría y se condensa en forma de lluvia (Sarochar et al., 2005). El cambio climático ha incrementado estas variaciones, lo que ha provocado un incremento en la frecuencia y la intensidad de los eventos extremos de precipitación, planteando desafíos para la gestión de recursos y la planificación territorial (Fierro, 2010).

2.2. La Evolución de la Lluvia Ácida Desde la Revolución Industrial

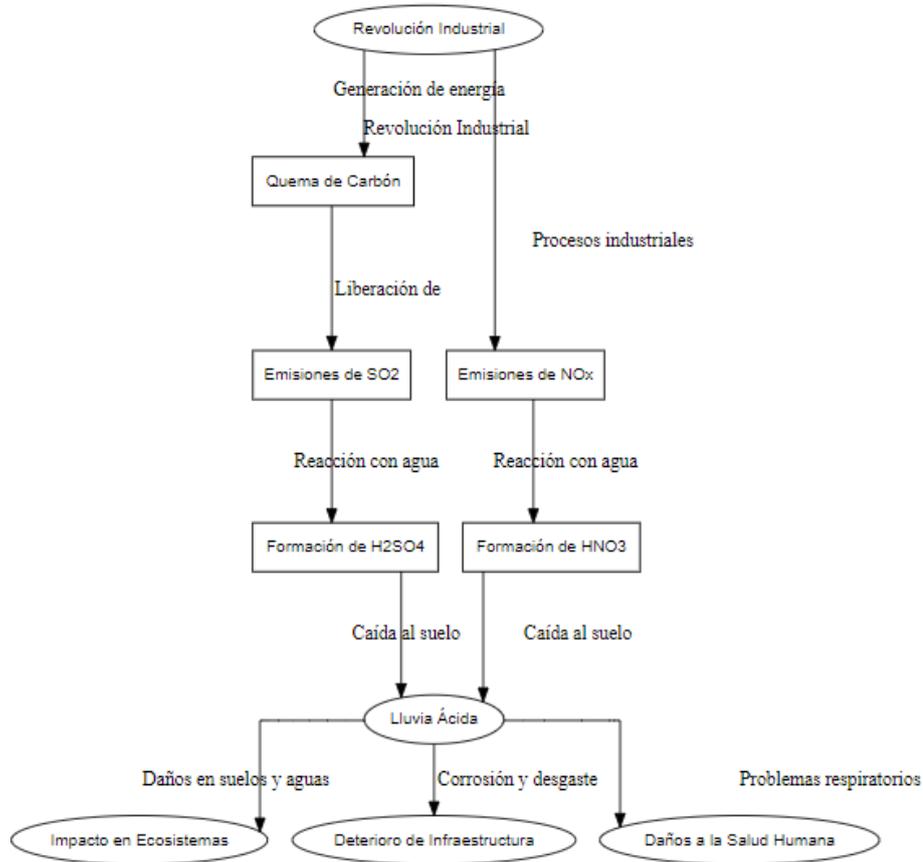
La lluvia ácida, como una forma de contaminación secundaria, se origina a partir de la contaminación atmosférica, la cual se intensificó durante la Revolución Industrial debido a la combustión masiva de carbón. Esta actividad liberó grandes cantidades de dióxido de azufre y

otros contaminantes en la atmósfera (Burns et al., 2016). Los principales contaminantes atmosféricos incluyen dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x) y material particulado fino (PM10 y PM2.5), los cuales se originan principalmente de actividades industriales y emisiones vehiculares (Anrango, 2019). Estos compuestos, una vez emitidos, pueden interactuar en la atmósfera formando sustancias nocivas como ácido sulfúrico y ácido nítrico, contribuyendo a la formación de lluvia ácida.

2.2.1. Formación de la Lluvia Ácida

La lluvia ácida se produce a través de una serie de reacciones químicas en la atmósfera. Los óxidos de azufre (SO_x) y de nitrógeno (NO_x), liberados por la combustión de combustibles fósiles, procesos industriales y actividades agrícolas, interactúan con el vapor de agua, oxígeno y otros componentes atmosféricos. Estas reacciones generan ácido sulfúrico (H_2SO_4) y nítrico (HNO_3), los cuales se disuelven en las gotas de lluvia, resultando en precipitación ácida. (Chen et al., 2021). La preocupación creciente por los efectos perjudiciales de la lluvia ácida en los ecosistemas y la salud humana ha impulsado la implementación de regulaciones ambientales más estrictas para mitigar estas emisiones (Sosa-Echeverría et al., 2018).

Figura 1 Lluvia ácida evolución desde la revolución industrial



Nota. El gráfico muestra la formación de la lluvia ácida desde la Revolución Industrial. Detalla cómo la quema de carbón y los procesos industriales liberan SO_2 y NO_x , que reaccionan con el agua para formar H_2SO_4 y HNO_3 , resultando en lluvia ácida. Adaptado de Burns et al. (2016).

2.2.2. Efectos en Ecosistemas Acuáticos y Terrestres

Los ecosistemas acuáticos son particularmente vulnerables a la lluvia ácida (Fierro, 2010). El aumento de la acidez en cuerpos de agua puede afectar negativamente a la biodiversidad acuática, incluyendo peces y plantas (Yang & Li, 2022). En los ecosistemas terrestres, la lluvia ácida puede lixiviar nutrientes esenciales del suelo, afectar la salud de los bosques y reducir la productividad agrícola. Esto resulta en suelos menos fértiles y en una mayor susceptibilidad de las plantas a enfermedades y plagas (Granados et al., 2010). Los efectos acumulativos a largo plazo pueden llevar a cambios irreversibles en la estructura y función de los ecosistemas, ya que la acidez del agua de lluvia puede liberar metales tóxicos como el aluminio, dañinos para la flora y fauna (Garcés & Hernández, 2004).

2.2.3. Efectos en la agricultura y ganadería

La lluvia ácida tiene un impacto adverso en la agricultura y la ganadería al alterar la química del suelo y afectar la calidad de los cultivos y pastos (Garcés & Hernández, 2004). La acidificación del suelo, resultado directo de la lluvia ácida, modifica el pH del suelo, lo que inhibe el crecimiento de los cultivos y reduce los rendimientos agrícolas. Esta acidificación provoca la descomposición de minerales esenciales, haciendo que estos sean menos disponibles para las plantas, afectando su desarrollo y productividad (Chen et al., 2021).

En el ámbito ganadero, la calidad de los pastos se deteriora debido a la acidificación del suelo, lo que puede comprometer la salud y la productividad del ganado. Los cultivos y forrajes expuestos a la lluvia ácida pueden acumular niveles tóxicos de aluminio y otros metales pesados, lo que representa un riesgo para la cadena alimentaria (Sosa-Echeverría et al., 2018). Además, la disminución de la calidad nutricional de los pastos puede llevar a un menor crecimiento y rendimiento del ganado, afectando la producción de carne y leche (Li et al., 2019).

2.2.4. Impactos en la salud humana

La exposición a la lluvia ácida y sus precursores (SO_x y NO_x) está asociada con problemas de salud respiratoria, como el asma y la bronquitis crónica. Estos contaminantes pueden agravar condiciones existentes y aumentar la incidencia de enfermedades respiratorias. La inhalación de partículas finas formadas a partir de SO₂ y NO_x en la atmósfera puede causar inflamación de las vías respiratorias, aumentando el riesgo de desarrollar enfermedades respiratorias graves (Granados et al., 2010). Además, el ozono a nivel del suelo, que también se forma a partir de NO_x, puede causar problemas respiratorios adicionales, como neumonía y daño pulmonar permanente (Giraldo et al., 2018).

Por otro lado, puede contaminar fuentes de agua potable, lo que representa un riesgo adicional para la salud pública, especialmente en áreas con infraestructura insuficiente para tratar el agua adecuadamente (Chen et al., 2021). La disolución de metales tóxicos, como el aluminio, en el agua debido a la lluvia ácida aumenta los riesgos de enfermedades cuando esta agua se utiliza para consumo humano. Investigaciones revelan que la lluvia ácida no solo daña

materiales y edificios, sino que también contribuye a la disolución de metales tóxicos, incrementando los riesgos de enfermedades como la fluorosis dental y problemas gastrointestinales (Flores & Bonilla, 2010).

2.3. Análisis Espacio-Temporal de la Lluvia Ácida

El análisis espacio-temporal en las ciencias ambientales surge de la necesidad de entender cómo los procesos ecológicos varían a través del tiempo y el espacio. Esta metodología permite investigar la dinámica de fenómenos como la contaminación y los patrones de lluvia ácida, utilizando herramientas como la estadística y los sistemas de información geográfica (SIG) (Carrera et al., 2021). Técnicas avanzadas como el “kriging” y la regresión ponderada geográficamente son fundamentales para identificar y predecir patrones ambientales, facilitando la gestión y la toma de decisiones informadas para mitigar los impactos ambientales (Fortin & Dale, 2009).

2.3.1. Origen y Evolución del Análisis Espacio-Temporal para las Ciencias Ambientales

El análisis espacio-temporal de la lluvia ácida emerge como una herramienta esencial para comprender la distribución y la variabilidad de este fenómeno a lo largo del tiempo y en distintas regiones geográficas. Esta metodología analítica es crucial para identificar tendencias y patrones que son fundamentales para la gestión ambiental y la implementación de políticas públicas efectivas (Li et al., 2022). Los avances tecnológicos y la creciente disponibilidad de datos ambientales han facilitado la realización de estos estudios, proporcionando una base científica robusta para la toma de decisiones informadas (Sosa-Echeverría et al., 2018). La distribución espacial de la lluvia ácida se ha estudiado mediante técnicas avanzadas de interpolación, permitiendo identificar zonas con niveles críticos de acidez que requieren atención prioritaria y acciones mitigadoras (Pabón, 2010).

2.3.2. Monitoreo Espacio-Temporal de la Lluvia Ácida

Implica la recopilación sistemática y continua de datos en múltiples ubicaciones y momentos. Para ello, se emplea una combinación de estaciones de monitoreo, sensores y satélites que permiten obtener datos precisos sobre la composición química de la precipitación y sus variaciones temporales (Chen et al., 2021). Este enfoque proporciona una evaluación exhaustiva de los cambios ambientales y sus impactos, facilitando la creación de modelos

predictivos robustos (Flores & Bonilla, 2010). La implementación de tecnologías avanzadas, como la cromatografía de iones para la medición de contaminantes específicos, es esencial en estos estudios, ya que permite una detección precisa y detallada de los componentes de la lluvia ácida (Chaves-Solano et al., 2021).

Un aspecto del monitoreo espacio-temporal es la capacidad de detectar diferencias en los entornos o espacios que presentan variaciones significativas en las concentraciones de lluvia ácida. Por ejemplo, las actividades comerciales e industriales tienden a emitir mayores cantidades de contaminantes, resultando en niveles elevados de lluvia ácida en comparación con zonas con abundantes parques y cuerpos de agua, donde las concentraciones suelen ser menores. Este tipo de análisis espacial es crucial para comprender cómo las distintas características del uso del suelo impactan en los niveles de contaminación (Li et al., 2019).

Permite realizar evaluaciones periódicas a lo largo de los años y meses, ofreciendo datos sobre la evolución de la calidad del aire y la efectividad de las intervenciones ambientales. Este seguimiento continuo es esencial para ajustar y optimizar las estrategias de mitigación, lo que garantiza que la implementación de medidas para reducir la lluvia ácida sea efectiva a largo plazo. Además, facilita la identificación de tendencias y cambios en los patrones de precipitación ácida, lo cual es fundamental para adaptar las políticas ambientales a las nuevas realidades y necesidades emergentes detectadas en el análisis temporal (Chen et al., 2021). Evaluar los resultados de las políticas y medidas adoptadas a lo largo del tiempo asegurar un enfoque proactivo y eficiente en la mitigación de los efectos adversos de la lluvia ácida (Li et al., 2022).

2.3.3. Instrumentos de Medición

Los instrumentos utilizados para monitorear la lluvia ácida incluyen colectores de precipitación, analizadores de iones y equipos de espectroscopía. Estos dispositivos permiten medir concentraciones de SO_4 , NO_3 y otros iones relevantes, así como parámetros físicos como el pH y la conductividad (Fierro, 2010). La precisión y la consistencia de estos instrumentos son cruciales para obtener datos fiables y útiles para el análisis. La implementación de tecnologías avanzadas mejora la calidad del monitoreo y facilita la toma de decisiones informadas (Torres, 2021).

2.3.4. Herramientas Utilizadas: Estadística Multivariada y Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Para analizar los datos espacio-temporales de la lluvia ácida, se emplean herramientas avanzadas como la estadística multivariada y los sistemas de información geográfica (SIG). La estadística multivariada permite identificar patrones complejos y relaciones entre múltiples variables (Flores & Bonilla, 2010; Carrera et al., 2021), mientras que los SIG facilitan la visualización y el análisis espacial detallado (Sosa-Echeverría et al., 2018). La combinación de estas herramientas es esencial para formular estrategias efectivas de mitigación y adaptación. Específicamente, la interpolación espacial mediante “kriging” ha sido efectiva para mapear la distribución del pH y otros contaminantes en el agua de lluvia, destacando las áreas más afectadas y permitiendo planificar intervenciones específicas (Torres, 2021).

2.4. Marco legal

Para esta investigación, es fundamental realizar una exhaustiva revisión de la legislación y reglamentos nacionales de Ecuador, específicamente sobre el análisis de la lluvia ácida en el cantón Ibarra. Esta revisión es esencial para asegurar que el estudio se alinee con el marco jurídico vigente y cumpla con todas las normativas aplicables.

2.4.1. Constitución de la República de Ecuador

La Constitución de la República del Ecuador establece el marco normativo para la protección y conservación del medio ambiente, incluyendo disposiciones específicas para el análisis de la lluvia ácida, donde el Artículo 14 reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, garantizando la sostenibilidad y el buen vivir, conocido como *sumak kawsay*. Complementariamente, el Artículo 66, numeral 27, reafirma el derecho a la salud y a vivir en un ambiente libre de contaminación. Por último, el Artículo 397 destaca la responsabilidad compartida del Estado y los ciudadanos en la protección del derecho al ambiente, obligando a tomar medidas preventivas y correctivas para evitar y controlar la contaminación ambiental (Asamblea Nacional del Ecuador, 2021).

2.4.2. Tratados y Convenios Internacionales

El Convenio de Estocolmo compromete a Ecuador a reducir y eliminar los contaminantes que contribuyen a la formación de la lluvia ácida (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2010).

2.4.3. Código Orgánico del Ambiente (CODA)

El Artículo 3 define los principios de protección ambiental, subrayando la importancia de la prevención y el control de la contaminación como elementos esenciales para salvaguardar los ecosistemas. En concordancia, el Artículo 22 regula las emisiones contaminantes mediante la fijación de límites permisibles y la implementación de mecanismos de control diseñados para prevenir la contaminación atmosférica, un factor crucial en la mitigación de la lluvia ácida.

Adicionalmente, el Artículo 25 destaca la necesidad de sistemas de monitoreo ambiental, que permiten evaluar continuamente la calidad del aire y detectar la presencia de contaminantes que contribuyen a la formación de lluvia ácida. Para complementar estas medidas, el Artículo 28 establece la planificación y ejecución de programas de descontaminación y control de la contaminación atmosférica, asegurando una respuesta efectiva y coordinada frente a las amenazas ambientales (Ministerio del Ambiente, 2017).

2.4.4. Acuerdo Ministerial Nro. 097-A

Emitido por el Ministerio del Ambiente del Ecuador, establece los Límites Máximos Permisibles (LMP) para emisiones de contaminantes atmosféricos provenientes de fuentes fijas.

- Incluye los siguientes contaminantes relevantes para la lluvia ácida:
- SO₂ (dióxido de azufre): límite ≤ 100 mg/Nm³ para procesos industriales.
- NO_x (óxidos de nitrógeno): límite ≤ 200 mg/Nm³ dependiendo del proceso.

Este acuerdo es una herramienta clave en la regulación de emisiones industriales que aportan a la formación de precipitación ácida.

2.4.4. Código Orgánico Integral Penal (COIP)

El Artículo 252, que penaliza los delitos contra la salud pública relacionados con la emisión de contaminantes que deterioran la calidad del aire y afectan la salud de las personas,

y el Artículo 253, que establece sanciones para quienes, mediante la emisión de contaminantes, causen daños a los recursos naturales, incluyendo suelos y cuerpos de agua afectados por la lluvia ácida (Asamblea Nacional del Ecuador, 2021).

2.4.5. Objetivos del Desarrollo Sostenible

El Objetivo 13 se centra en la acción inmediata para mitigar el cambio climático, enfatizando la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y el fortalecimiento de la resiliencia ante desastres climáticos a través de políticas ambientales sostenibles. El Objetivo 15 aborda la gestión sostenible de los ecosistemas terrestres, la conservación de la biodiversidad y la lucha contra la deforestación y la desertificación, asegurando el uso responsable de los recursos naturales y promoviendo la restauración (Organización de las Naciones Unidas, 2022).

2.4.6. Planes y Políticas Nacionales

Plan de Desarrollo para el Nuevo Ecuador 2024-2025. El Objetivo 12 promueve el desarrollo sostenible y combate el cambio climático mediante la mitigación y adaptación, fomentan modelos económicos circulares para reducir la contaminación y respetar los ecosistemas, además apoya prácticas ambientales sostenibles con responsabilidad social y económica, incentivando la investigación e innovación (Secretaría Nacional de Planificación, 2024).

2.4.7. Ordenanzas Locales

De acuerdo con la "Ordenanza para la Protección de la Calidad Ambiental en lo Relativo a la Contaminación por Desechos No Domésticos Generados por Fuentes Fijas del Cantón Ibarra," el Capítulo II aborda específicamente el control de desechos orgánicos y emisiones. En este marco, el Artículo 20 detalla los métodos técnicos para la medición y el cálculo de la carga combinada de contaminantes presentes en los desechos líquidos y las emisiones atmosféricas (Consejo Municipal de Ibarra, 2012).

CAPITULO III

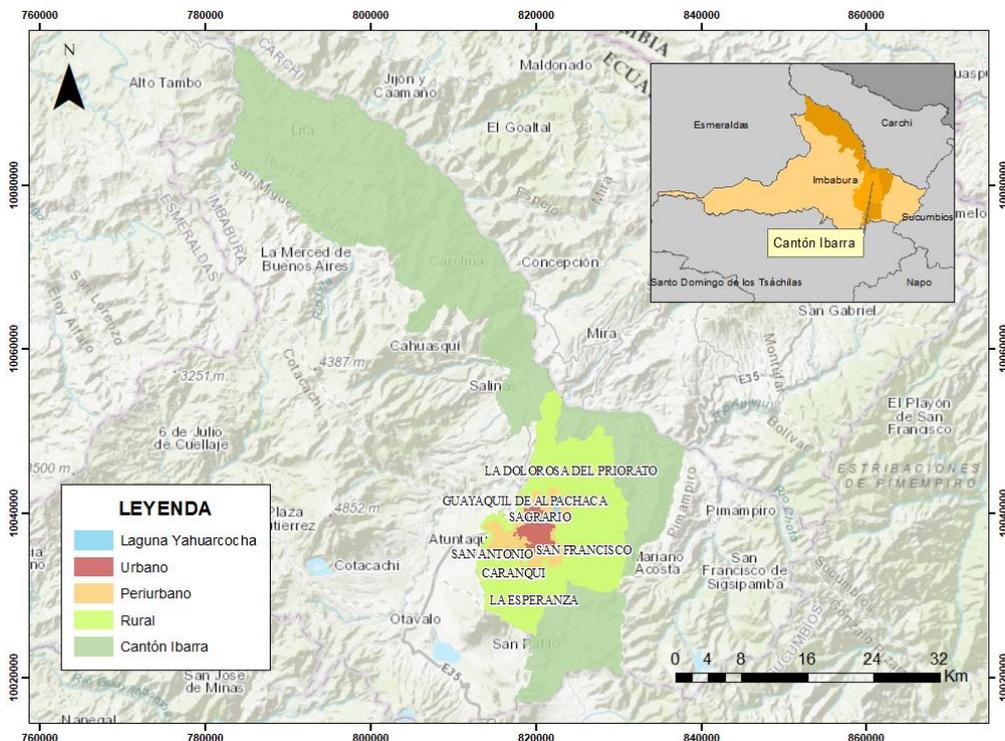
METODOLOGÍA

Esta investigación se llevó a cabo en el cantón de Ibarra, provincia de Imbabura. La metodología abarcó áreas urbanas, periurbanas y rurales, además de considerar aspectos meteorológicos y geospaciales relevantes. Se emplearon métodos cualitativos para obtener una comprensión integral del fenómeno de la lluvia ácida en el cantón Ibarra.

3.1 Descripción del Área de Estudio

El cantón Ibarra, situado en la provincia de Imbabura en el norte de Ecuador, fue el área de estudio del presente trabajo. Para una mejor delimitación, se dividió en tres zonas principales: urbana, periurbana y rural. Ibarra, la capital provincial, se encuentra a una altitud de 2.225 msnm, a una distancia de 115 km al noroeste de Quito y 125 km al sur de Tulcán. El clima de Ibarra se caracteriza por ser seco, templado y agradable, con una temperatura media de 18°C (Plan De Desarrollo Y Ordenamiento Territorial del Cantón Ibarra, 2023).

Figura 2 Mapa de la zona urbana, periurbana y rural del cantón Ibarra, provincia de Imbabura



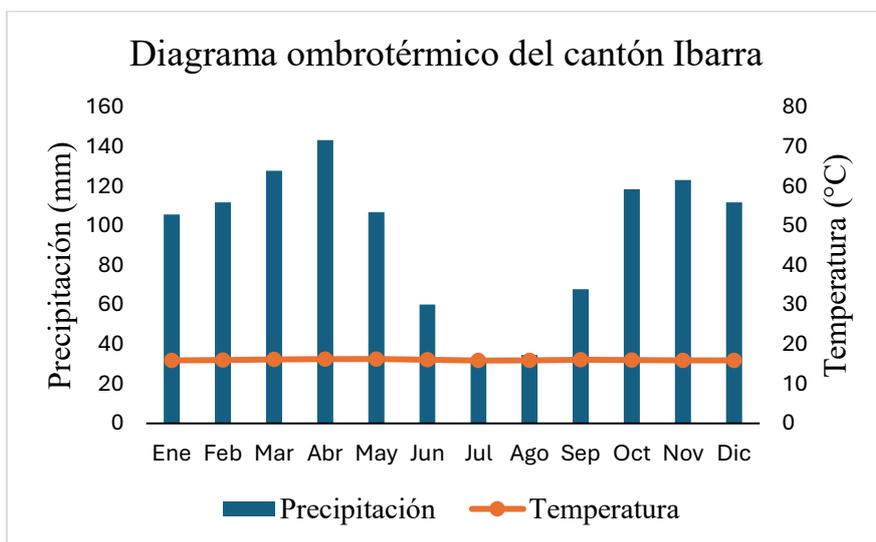
- **Área Urbana:** Se define por su alta densidad poblacional, infraestructura urbana avanzada y una actividad comercial intensiva.
- **Área Periurbana:** Se caracteriza por ser una zona de transición entre la ciudad y las áreas rurales, con una diversidad de usos del suelo que incluyen zonas residenciales de baja densidad.
- **Área Rural:** Se encuentra alejada del centro urbano, predominando las actividades agrícolas y presentando una menor densidad poblacional en comparación con las áreas urbanas y periurbanas (Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2024).

3.2 Recolección de Datos

3.2.1 Datos Meteorológicos

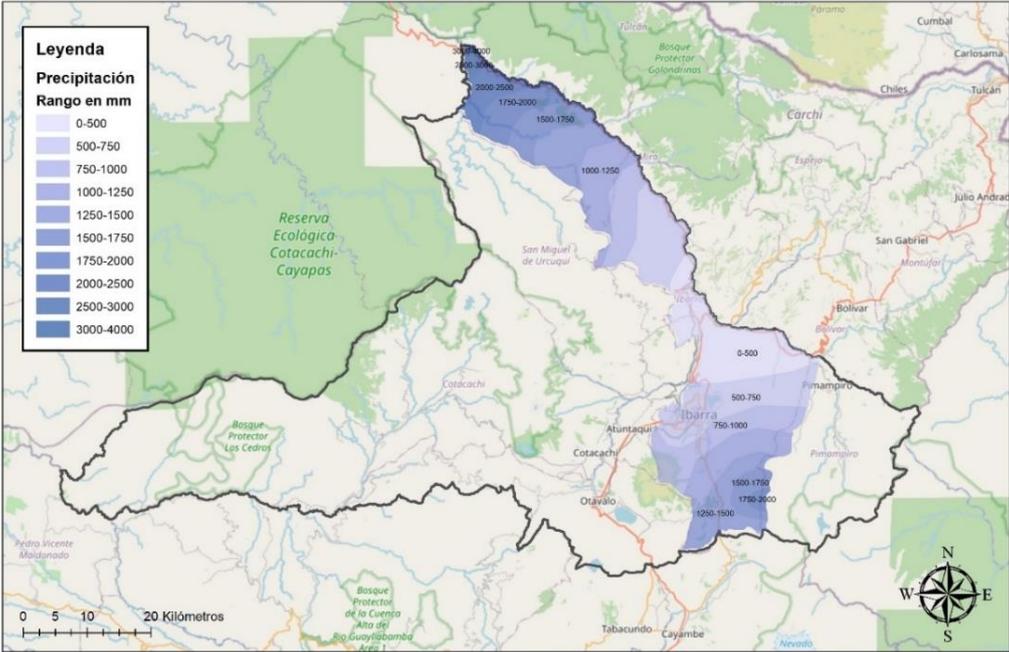
Para el análisis meteorológico en esta investigación, se emplearon datos recabados por estaciones meteorológicas estratégicamente ubicadas en las tres áreas de estudio seleccionadas. Se considerarán diversas variables de acuerdo con los parámetros establecidos por el Instituto Nacional de Hidrología y Meteorología-INAMHI, (2024) incluyendo pronósticos meteorológicos y otros indicadores relevantes para su evaluación.

Figura 3 Diagrama ombrotérmico del cantón Ibarra



Nota. Tomado de Anrango (2019).

Figura 4 Mapa de isoyetas del cantón Ibarra

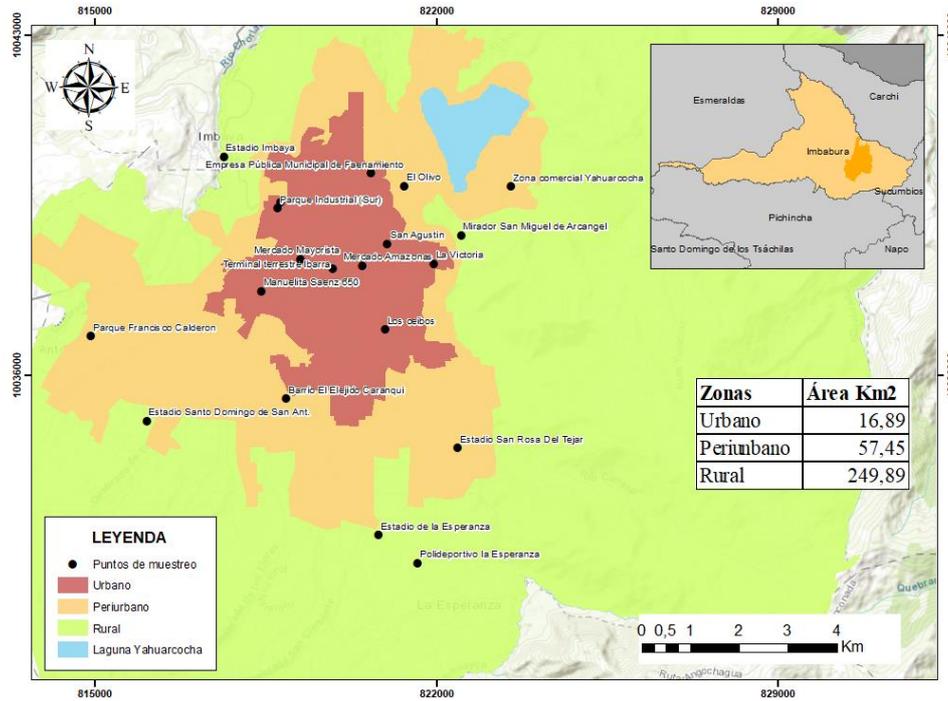


3.2.2. Datos Geospaciales

Se utilizaron herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para examinar la distribución espacial de la lluvia ácida en el área de estudio. Los datos geospaciales abarcaron mapas de isoyetas, la ubicación de las fuentes de emisión de contaminantes e información obtenida en los puntos de muestro.

3.3 Muestras de Lluvia

Figura 5 Mapa de puntos de muestro en las zonas urbana, periurbana y rural



Para ubicar los puntos de muestreo, se utilizó un diseño de muestreo estratificado aleatorio. Se seleccionaron 20 puntos distribuidos en zonas urbanas (10), periurbanas (5) y rurales (5). Cada punto de selección estuvo ubicado al menos a un radio de entre 500 m y 1 km alrededor del mismo, para garantizar una cobertura representativa de la zona. Los puntos en la zona rural sirvieron como zonas de referencia, representando áreas con mínima intervención humana.

En cada punto de muestreo, se instalan colectores pluviales para capturar muestras durante cada evento de precipitación. Estos dispositivos fueron diseñados con medidas específicas para mitigar la contaminación y garantizar la preservación intacta de las muestras hasta su posterior análisis. Los recolectores fueron ubicados a una altura de entre 1,5 m y 2 m, para evitar la contaminación por salpicaduras (Aimacaña, 2016). Las muestras se recolectaron en botellas plásticas de 1 litro, cada una equipada con un embudo que facilitó la captación del agua de lluvia. La operación de los recolectores fue continua durante un período de cuatro meses para asegurar una representación adecuada de las condiciones ambientales y pluviométricas durante el estudio (Flores & Bonilla, 2010).

3.4 Análisis de Laboratorio

3.4.1. pH y Conductividad

Para medir el pH se utilizó un medidor portátil marca Hanna, realizando mediciones in situ. En cada punto de muestreo se realizaron tres repeticiones de 2 minutos cada una, en el fin de obtener un valor promedio más representativo. Por otro lado, la conductividad eléctrica se midió utilizando un sensor multipropósito marca Orion, previamente calibrado. Las mediciones de ambos parámetros se llevaron a cabo entre 12 y 24 horas después de la recolección de las muestras, siguiendo protocolos establecidos para garantizar la confiabilidad de los resultados (Rodríguez, 2019).

3.4.2. Sólidos Suspendidos Totales y Sólidos Totales

Para los Sólidos Suspendidos Totales (SST) se utilizaron cápsulas de porcelana de 100 ml y filtros de microfibras de vidrio de 1,6 micras. Tanto el filtro como la cápsula fueron previamente secados en horno a 105 °C durante 2 horas y posteriormente pesados para obtener su peso inicial. Luego, se realizó la filtración de 100 ml de cada muestra de agua lluvia a través del filtro. Una vez completada la filtración, tanto el filtro como la cápsula fueron nuevamente llevadas al horno durante otras 2 horas para eliminar el contenido de humedad presente. Finalmente, se colocaron en el desecador por 3 minutos y se procedió a obtener el peso final.

Para el análisis de sólidos totales (ST), se utilizaron cápsulas de porcelana de 150 ml, las cuales fueron secadas previamente en horno a 105 °C durante 2 horas, con el objetivo de eliminar cualquier rastro de humedad. Luego, las porcelanas fueron colocadas en un desecador durante 3 minutos para estabilizar su temperatura y así conseguir el peso inicial utilizando una balanza analítica y alta precisión. A continuación, se vertieron 100 ml de muestra de agua lluvia previamente homogenizada correspondiente a los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero. Las porcelanas con las muestras fueron colocadas en el horno durante 24 horas a temperatura constante. Posteriormente, se trasladaron nuevamente al desecador y pesadas nuevamente para obtener el peso final. La diferencia entre el peso final y el inicial permitió calcular la concentración de sólidos totales en la muestra, expresada en mg/L (Torres, 2021).

El cálculo de los sólidos totales se realizó mediante la fórmula:

$$\text{Concentración (mg/L)} = \frac{(Pf - Pi) \times 1000000}{100}$$

Donde:

Pf = peso final (g)

Pi = peso inicial (g)

100 = volúmenes de la muestra en mililitros

3.5 Análisis Espacio-Temporal

Se empleó el software ArcGIS como herramienta principal para el procesamiento y análisis espacial de los datos recolectados, para ello, se organizó la información obtenida en campo correspondiente al pH, sólidos totales y sólidos totales suspendidos de cada uno de los puntos de muestreo. Estos datos fueron llevados a Microsoft Excel, asignando a cada registro sus respectivas coordenadas geográficas y fechas de recolección.

Luego, los datos fueron importados a la plataforma ArcGIS, donde se realizó el análisis espacial. Para ello, se utilizó la herramienta de interpolación IDW (Inverse Distance Weighting), la cual permitió estimar los valores en áreas no muestreadas a partir de los valores registrados en los puntos cercanos. Esta técnica facilitó la visualización de la distribución espacial y temporal de los parámetros analizados, lo que permitió observar patrones de comportamiento y posibles tendencias estacionales en la acidez del agua lluvia dentro del área de estudio (By et al., 2001).

3.6 Validación y Verificación

Para asegurar la precisión y confiabilidad de los modelos, se realizaron procesos de validación y verificación, incluyendo:

- **Evaluación de errores:** Se calcularon errores absolutos y relativos, así como coeficientes de variación, para evaluar la precisión y exactitud de las mediciones.
- **Comparación con datos históricos:** Se compararon los resultados actuales con datos históricos de estudios previos en la región para evaluar la consistencia y tendencias a largo plazo (Arias, 2023).

3.7 Materiales y equipos

Tabla 1 *Materiales y equipos en la investigación*

N°	Descripción	Detalles
Materiales		
1	Muestras de agua lluvia	Embudo, contenedores de polipropileno con capacidad de 1 litro, estériles, con tapa hermética para evitar contaminación.
2	Filtros	Filtro microfibra de vidrio GF1 47 mm
3	Kit pruebas Sulfato	Kit químico de pruebas utilizando el método turbidimétrico para medir sulfato
4	Kit pruebas Nitrato	Kit químico que usa el método de reducción de cadmio para medir nitrato
5	Medidor de pH	Medidor de bolsillo pHep+ a prueba de agua para pH con resolución de 0.01
Equipos		
6	Software de Sistema de Información Geográfica (SIG)	ArcGIS: Para análisis espacial y mapeo, con extensiones para análisis de geoprocésamiento. Datos de Satélite y Cartografía: Mapas base, imágenes de satélite, y datos de elevación digital.
7	Software de análisis estadístico	Herramientas de análisis de datos y modelado estadístico.
8	Equipos de Protección Personal	Guantes de Nitrilo Batas de Laboratorio
9	GPS	Dispositivo GPS Portátil
Insumos		
10	Materiales de laboratorio	Embudo de plástico grande Probeta de vidrio de 100 ml Potenciómetro Medidor de conductividad eléctrica

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Caracterización físico-química de las precipitaciones

4.1.1 pH y conductividad

El análisis mensual de los valores promedio de pH y conductividad eléctrica en las precipitaciones recolectadas en el cantón Ibarra permitió establecer diferencias sustanciales entre zonas urbanas, periurbanas y rurales. Estos parámetros físicoquímicos reflejan la influencia de factores antropogénicos, como las emisiones industriales, el tránsito vehicular y el uso del suelo, los cuales tienden a alterar la composición química del agua de lluvia, especialmente en áreas con mayor actividad humana.

Tabla 2 Promedios de pH y conductividad en el mes de noviembre

Zona	pH Promedio	Conductividad Eléctrica
Urbana	7,2	27 μ S/cm
Periurbana	7,2	58 μ S/cm
Rural	6,6	18,3 μ S/cm

Nota. La tabla muestra los valores promedio de pH y conductividad eléctrica, las medidas fueron de acuerdo con la recolección de muestras de precipitación que fueron siete en total del mes.

En el mes de noviembre, se evidenciaron diferencias marcadas en los parámetros de pH y conductividad eléctrica entre las zonas urbana, periurbana y rural del cantón Ibarra. Aunque la recolección de muestras se vio afectada por la época de estiaje, se logró obtener datos representativos de cada zona estratégica. Las precipitaciones en la zona rural presentaron una acidez ligeramente mayor en comparación con las zonas urbana y periurbana, lo que podría reflejar una menor influencia de actividades humanas que emiten compuestos alcalinos. La conductividad eléctrica fue más elevada en la zona periurbana, lo que indicó una mayor concentración de iones disueltos, asociados a la combinación de emisiones provenientes del tránsito, actividades industriales y asentamientos en expansión.

Tabla 3 Promedios de pH y conductividad en el mes de diciembre

Zona	pH Promedio	Conductividad Eléctrica
------	-------------	-------------------------

Urbana	6,9	16,5 $\mu\text{S/cm}$
Periurbana	6,7	13,8 $\mu\text{S/cm}$
Rural	6,7	12 $\mu\text{S/cm}$

Nota. La tabla muestra los valores promedio de pH y conductividad eléctrica medidos en distintas zonas del cantón Ibarra.

Los promedios de pH y conductividad eléctrica en las precipitaciones del cantón reflejaron una ligera disminución en la alcalinidad del agua de lluvia en comparación con el mes anterior, siendo los valores similares entre zonas urbana, periurbana y rural. Esta homogeneidad en los niveles de acidez sugiere una distribución más uniforme de los contaminantes atmosféricos durante el periodo. La conductividad eléctrica, aunque baja en general, fue mayor en la zona urbana, lo que se atribuyó al incremento de la actividad vehicular, comercial y festiva característica de la temporada decembrina, factores que aumentan la concentración de partículas y gases contaminantes en la atmósfera.

Tabla 4 Promedios de pH y conductividad en el mes de enero

Zona	pH Promedio	Conductividad Eléctrica
Urbana	7,1	18,2 $\mu\text{S/cm}$
Periurbana	6,9	22,4 $\mu\text{S/cm}$
Rural	7,2	18 $\mu\text{S/cm}$

Nota. La tabla muestra los valores promedio de pH y conductividad eléctrica medidos en distintas zonas del cantón Ibarra.

En el mes de enero, los valores promedio de pH en las precipitaciones del cantón Ibarra se mantuvieron cercanos a la neutralidad, sin evidencias de acidez significativa. La zona rural presentó el pH más neutro, lo que indicaría una atmósfera menos impactada por fuentes contaminantes. La conductividad eléctrica se elevó en la zona periurbana, lo cual puede atribuirse a actividades agrícolas o urbanas emergentes. En contraste, en Nueva Loja se identificó una situación más crítica, donde el 65 % de los sitios de muestreo presentó pH por debajo de 5,6, indicando lluvia ligeramente ácida, con valores mínimos de hasta 4,8 y máximos de 6,5. A pesar de esta acidez, la conductividad fue baja (3,3 a 19,8 $\mu\text{S/cm}$), lo que se asoció a una atmósfera limpia debido a intensas precipitaciones que eliminan contaminantes del (Carrera et al., 2021). Esta comparación resalta que, si bien Ibarra no presentó lluvia ácida, zonas amazónicas como Nueva Loja sí enfrentan este fenómeno, posiblemente por emisiones hidrocarbúricas y menor dispersión atmosférica.

Tabla 5 Promedios de pH y conductividad en el mes de febrero

Zona	pH Promedio	Conductividad Eléctrica
Urbana	6,1	27 $\mu\text{S/cm}$
Periurbana	7,2	50,8 $\mu\text{S/cm}$
Rural	7,1	13,6 $\mu\text{S/cm}$

Nota. La tabla muestra los valores promedio de pH y conductividad eléctrica medidos en distintas zonas del cantón Ibarra.

Durante el mes de febrero, los valores promedio de pH en las zonas urbana 6,1, periurbana 7,2 y rural 7,1 del cantón Ibarra se mantuvieron dentro de un rango neutro a ligeramente básico, descartando la presencia de lluvia ácida. La conductividad eléctrica presentó un comportamiento variable, siendo más elevada en la zona periurbana 50,8 $\mu\text{S/cm}$, lo que sugiere una mayor carga iónica. Estos resultados contrastan con el estudio realizado en Quito, donde se reportó que más del 50 % de las precipitaciones presentaron pH inferior a 5,6, evidenciando condiciones de lluvia ácida atribuibles a una mayor concentración de contaminantes como óxidos de nitrógeno y azufre, producto del tráfico vehicular e industrial (Flores & Bonilla, 2010).

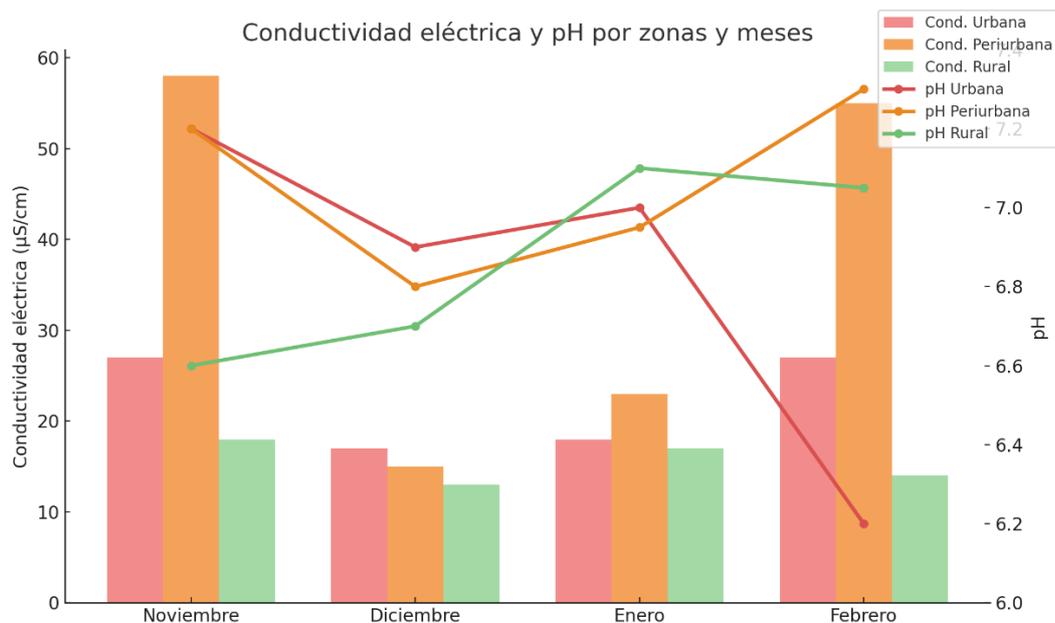
La diferencia observada puede explicarse por la menor densidad poblacional e industrial de Ibarra, así como por condiciones meteorológicas distintas durante el periodo de muestreo. Sin embargo, ambos estudios coinciden en identificar variaciones espaciales en la calidad de la precipitación, asociadas a la influencia del entorno urbano. La elevada conductividad en áreas periurbanas de Ibarra refleja la posible contribución de partículas atmosféricas y sedimentos transportados, lo que guarda similitud con los patrones de contaminación detectados en zonas de transición en Quito. Estas observaciones subrayan la importancia de considerar la heterogeneidad espacial en el análisis de la calidad de la lluvia.

4.1.2 Dinámica atmosférica en la variación del pH y la conductividad

Durante los cuatro meses de análisis, los resultados obtenidos en torno al pH y la conductividad eléctrica de las precipitaciones en el sector permitieron identificar una relación directa con la actividad humana. En las zonas urbanas y periurbanas se observaron alteraciones más marcadas en ambos parámetros, lo que puede explicarse por la influencia de fuentes emisoras como el tráfico vehicular, la quema de combustibles, residuos sólidos y el incremento de actividades festivas de época. Estas acciones generan compuestos contaminantes, principalmente óxidos de azufre y nitrógeno, que reaccionan en la atmósfera para formar ácidos,

los cuales disminuyen el pH del agua de lluvia. A su vez, el aumento de la conductividad eléctrica, sobre todo en áreas periurbanas, estaría vinculado a una mayor presencia de partículas solubles derivadas de actividades agrícolas y asentamientos en crecimiento.

Figura 6 Variación estacional del pH y conductividad eléctrica en el cantón Ibarra de la lluvia ácida (Información clara anexo 1 y anexo 2)



Nota. En noviembre se registró la mayor conductividad, especialmente en zonas urbanas, indicando alta carga iónica. En febrero, el pH descendió notablemente en el área urbana, sugiriendo mayor acidez por acumulación de contaminantes.

Si bien las zonas rurales del cantón Ibarra presentaron concentraciones de sólidos disueltos relativamente bajas y estables, se identificaron momentos puntuales en los que los valores se elevaron, sugiriendo un fenómeno de transporte atmosférico de contaminantes desde zonas urbanas o periurbanas más intervenidas. Este comportamiento puede explicarse por la acción de los vientos, que actúan como vectores de aerosoles y gases contaminantes, desplazándolos a lo largo del territorio y favoreciendo su posterior deposición incluso en áreas alejadas de las fuentes de emisión.

Este fenómeno coincide con lo señalado por Garcés y Hernández (2005), quienes destacan que los óxidos de azufre y nitrógeno pueden recorrer grandes distancias antes de transformarse en compuestos ácidos, debido a procesos de dispersión y transporte atmosférico. Así, la lluvia ácida y su carga química no responden exclusivamente a factores locales, sino que

poseen un alcance regional condicionado por la dinámica meteorológica, lo que refuerza la necesidad de un monitoreo ambiental integral y continuo (Gongález, 2018).

4.1.3 Detección de niveles de sulfatos (SOx) y nitratos (NOx) en las muestras recolectadas

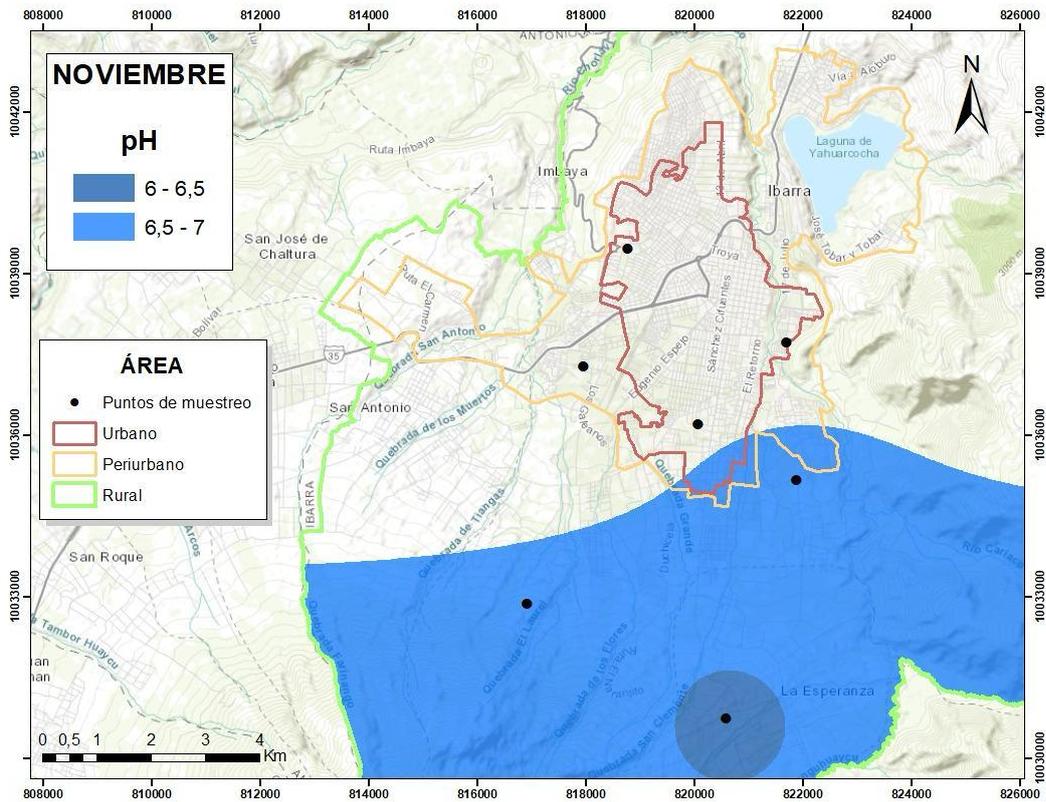
En el análisis de los niveles de sulfatos (SOx) y nitratos (NOx) en las muestras recolectadas, se identificaron limitaciones significativas en los resultados. Los instrumentos y reactivos utilizados para la detección presentaron una sensibilidad insuficiente para cuantificar estos compuestos en concentraciones muy bajas, lo que resultó en lecturas de 0 en todas las muestras analizadas. Este resultado no necesariamente indica la ausencia total de sulfatos y nitratos en la lluvia, sino que su concentración fue menor al límite de detección del equipo utilizado. Además, las muestras recolectadas no presentaron niveles significativos de estos compuestos para un análisis detallado, lo que sugiere que las precipitaciones en la ciudad de Ibarra durante el período de estudio no tuvieron una carga química suficientemente elevada en términos de los precursores principales de la lluvia ácida.

4.2 Distribución espacio-temporal de la lluvia ácida

4.2.1 Análisis espacio-temporal del pH y su variación en las zonas de estudio

La distribución espacio-temporal de la lluvia ácida se analizó en la ciudad de Ibarra, considerando tres zonas de estudio: urbana, periurbana y rural. Estas áreas fueron seleccionadas para evaluar las diferencias en los parámetros físico-químicos según el grado de influencia de las actividades humanas y las características naturales de cada zona. Los parámetros analizados incluyeron el pH, la conductividad eléctrica, los niveles de sulfatos y nitratos con cantidades significativas en el proceso, así como los sólidos totales presentes en las muestras recolectadas.

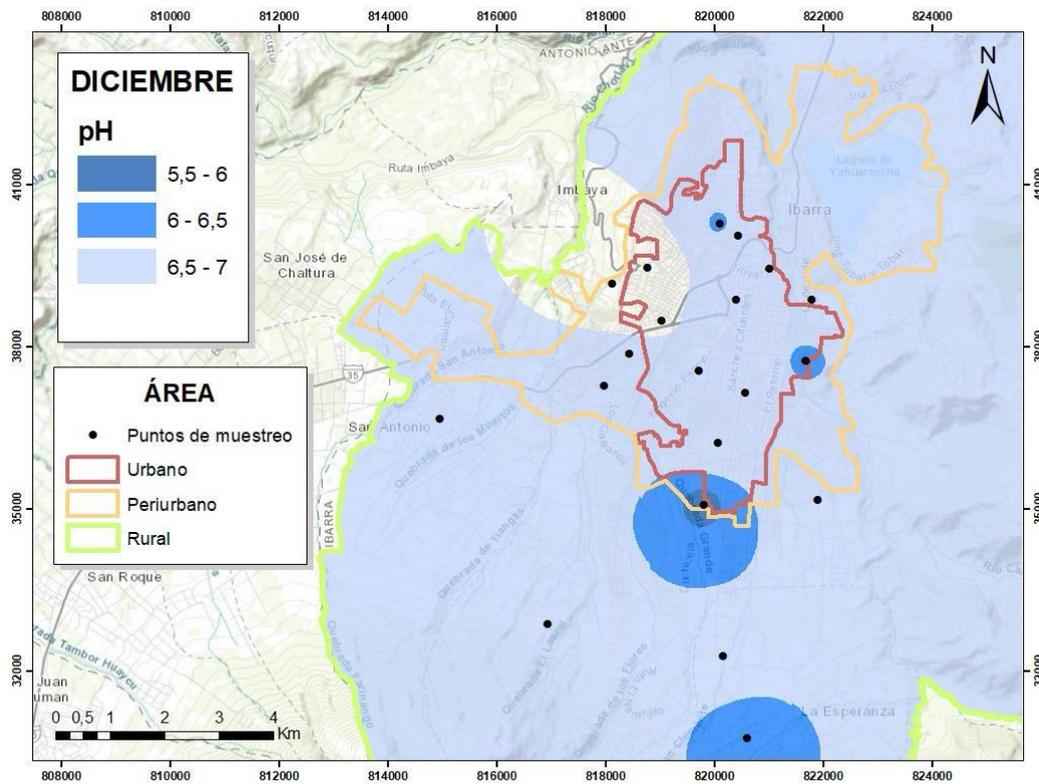
Figura 7 *Mapa del potencial hidrógeno (pH) en el mes de noviembre del agua lluvia año 2024*



Durante el mes de noviembre 2024, los valores de pH de la lluvia oscilaron entre 6,7 y 7,7 indicando lluvias de carácter ligeramente ácido a neutro. El valor más alto de pH 7,7 se registró en el límite entre la zona urbana y periurbana, mientras que, en la zona urbana, los valores de pH se encuentran entre 6,9 y 7,1. Las áreas con menor pH se encuentran principalmente en sectores periurbanos y urbanos, lo que podría estar asociado una influencia antrópica que afecta la composición química de la atmósfera local.

Según lo señalado por Fierro (2010), la actividad vehicular, el uso de combustibles fósiles y la quema de desechos sólidos en zonas urbanizadas son factores que incrementan la concentración de óxidos de nitrógeno (NO_x) y de azufre (SO_2), los cuales, al reaccionar con el vapor de agua en la atmósfera, forman ácidos débiles que reducen el pH de la precipitación.

Figura 8 Mapa del potencial hidrógeno (pH) en el mes de diciembre del agua lluvia año 2024



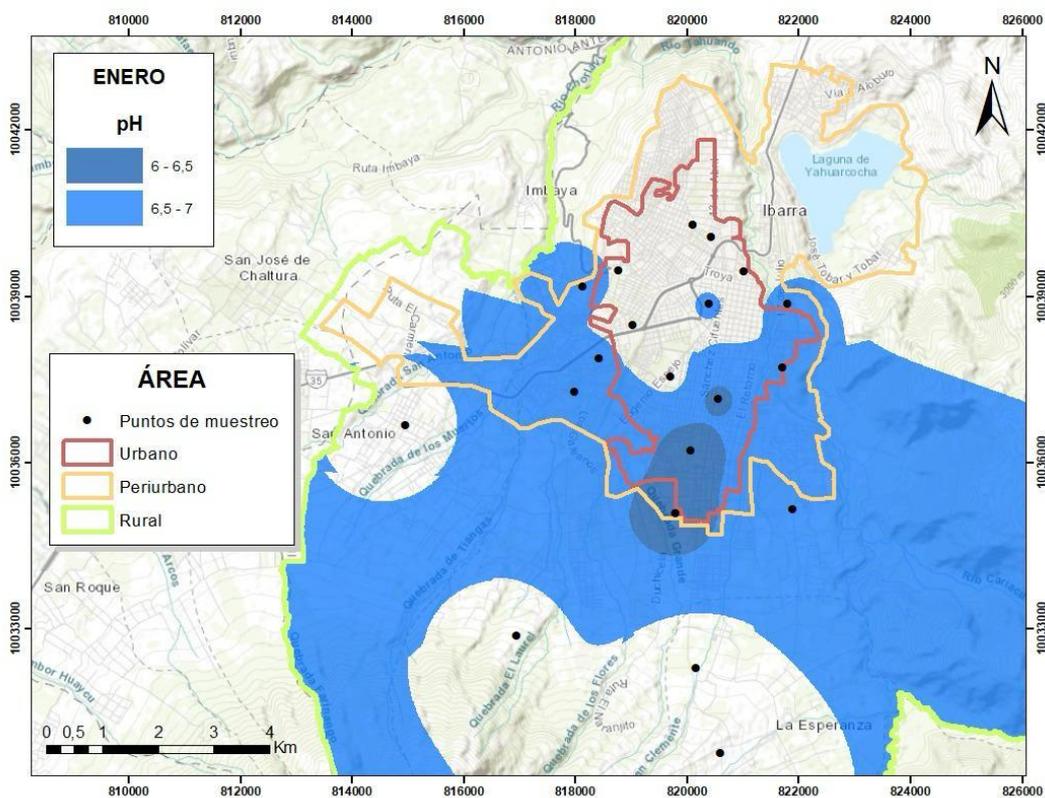
Durante el mes de diciembre 2024 se evidenció una ligera disminución en los valores de pH respecto a noviembre, con un rango que osciló entre 6,4 y 7,5. Aunque los valores no alcanzan niveles de lluvia ácida (<5.6), esta reducción indica un incremento en la carga de contaminantes atmosféricos en el inicio del periodo seco o durante episodios de menor precipitación, donde los contaminantes no son removidos eficientemente de la atmósfera (Flores & Bonilla, 2010).

La mayor acidez registrada en zonas periurbanas y rurales con un valor mínimo de 6,4 puede resultar contraintuitiva, pero responde a dinámicas locales como la quema de biomasa agrícola, el uso de fertilizantes nitrogenados y el arrastre de partículas que contienen compuestos ácidos (Torres, 2021). De hecho, estudios realizados por Flores y Bonilla, destacan que las zonas agrícolas pueden contribuir a la acidificación atmosférica a través de emisiones de amoníaco (NH_3), el cual en presencia de óxidos puede transformarse en ácido nítrico, reduciendo el pH de la lluvia (2010).

En el caso de las zonas urbanas, los valores que se ubicaron entre 6,6 y 6,9 se alinean con lo esperado en ciudades de tamaño intermedio como Ibarra. Estas cifras reflejan la

influencia directa de fuentes móviles como el tráfico, así como la combustión doméstica, además, la congestión urbana y los vientos limitados favorecen la acumulación de contaminantes atmosféricos (Chaves-Solano et al., 2021). Según Flores y Bonilla en climas tropicales andinos, diciembre marca una transición entre la temporada lluviosa y la seca, lo que puede generar una mayor concentración de partículas en suspensión y gases ácidos, especialmente si las lluvias aún no son suficientes para producir un lavado atmosférico efectivo (2010).

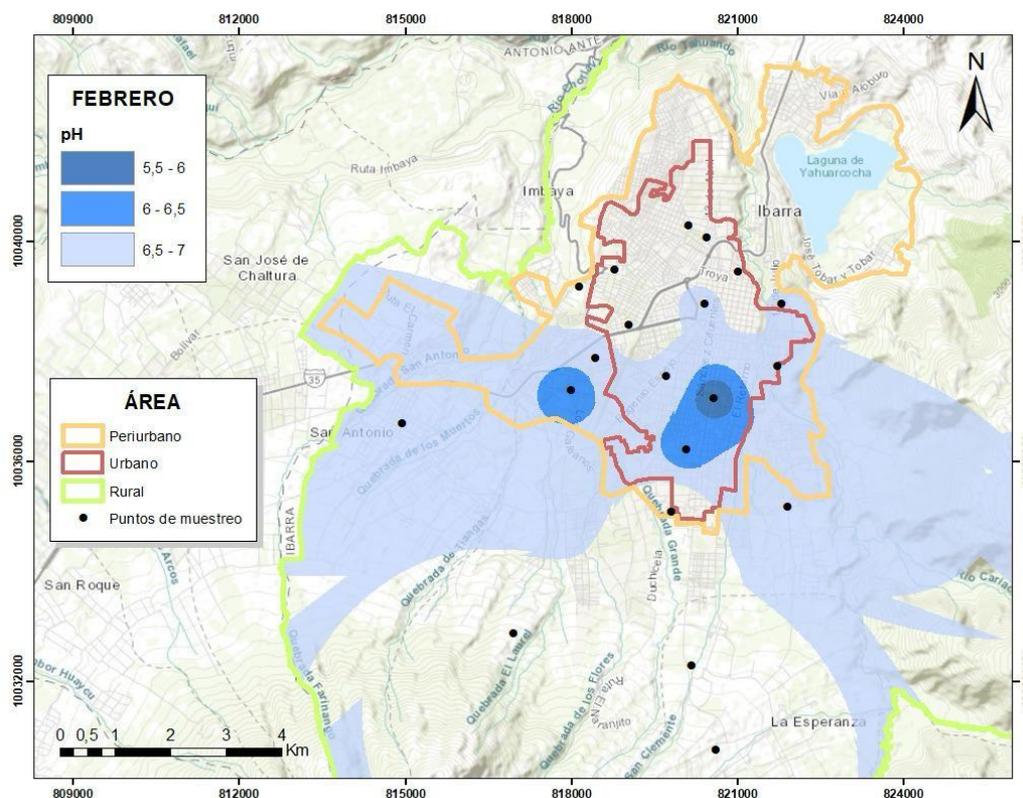
Figura 8 Mapa del potencial hidrógeno (pH) en el mes de enero del agua lluvia año 2025



Los valores de pH correspondientes al mes de enero 2025 se ubicaron entre 7 y 8 alcanzando niveles levemente alcalinos, lo cual presenta un cambio importante respecto a los meses previos. Esta tendencia sugiere una disminución de la carga de contaminantes ácidos en la atmósfera, probablemente atribuible a una mayor frecuencia e intensidad de lluvias que generaron un efecto de lavado atmosférico, reduciendo la concentración de óxidos de nitrógeno (NO_x) y azufre (SO_2), principales precursores de lluvia ácida (Torres, 2021).

A diferencia de los meses anteriores, enero no mostró una distribución espacial claramente asociada al grado de urbanización. Las zonas con valores bajos ~ 7 y altos ($>7,3$) estuvieron dispersas entre sectores rurales y periurbanos, lo que indica la presencia de factores locales diversos que afectan la composición de la lluvia. Este comportamiento podría estar vinculado a variables microclimáticas, tipo de suelo, cobertura vegetal o incluso a emisiones puntuales que no siguen un patrón urbano típico (Fierro, 2010).

Figura 9 Mapa del potencial hidrógeno (pH) en el mes de febrero del agua lluvia año 2025



Nota. Elaboración propia

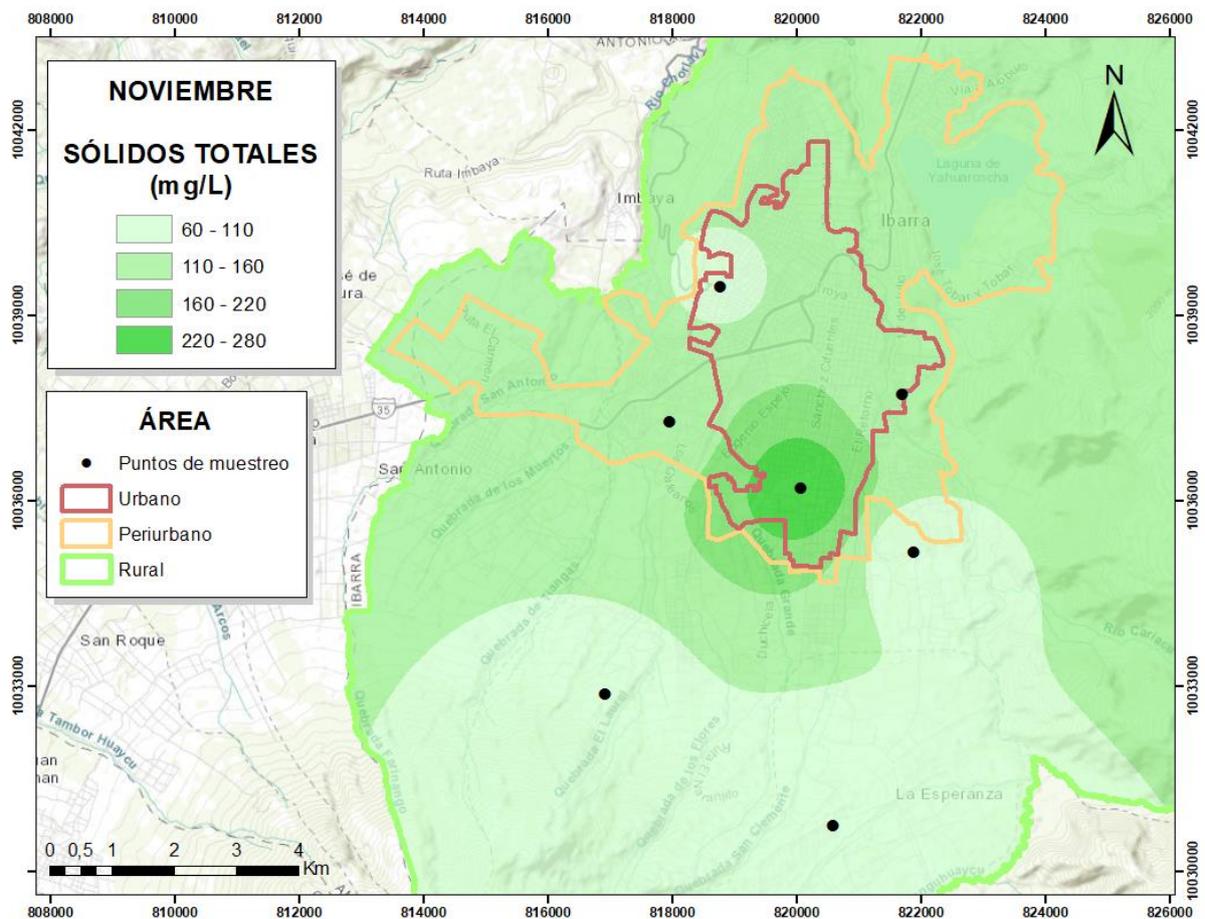
Para el mes de febrero 2025 los valores oscilaron entre menos del 6,8 y hasta 9, constituyendo el rango más amplio y alcalino registrado durante todo el periodo de estudio. La presencia de valores altos de pH, especialmente en el intervalo de 7,8 a 8,9, ubicados en zonas rurales y periurbanas, sugieren una atmósfera con baja concentración de contaminantes ácidos. Este comportamiento indica que la temporada lluviosa, que se intensifica en febrero en la región interandina, tiende a generar un efecto de "limpieza" atmosférica, arrastrando y disolviendo contaminantes antes de que se acumulen en cantidades suficientes como para acidificar la precipitación (Torres, 2021). Así, el lavado atmosférico frecuente favorece lluvias con pH

elevado, especialmente en áreas alejadas del tráfico vehicular y de fuentes fijas de emisión (Flores & Bonilla, 2010).

4.2.2 Análisis de los sólidos totales en las zonas de muestreo

En esta sección se presentó el comportamiento espacial de los sólidos totales (ST) en el agua de lluvia recolectada en las distintas zonas de muestreo siendo urbano, periurbano y rural.

Figura 10 Mapa de distribución de sólidos totales del mes de noviembre año 2024

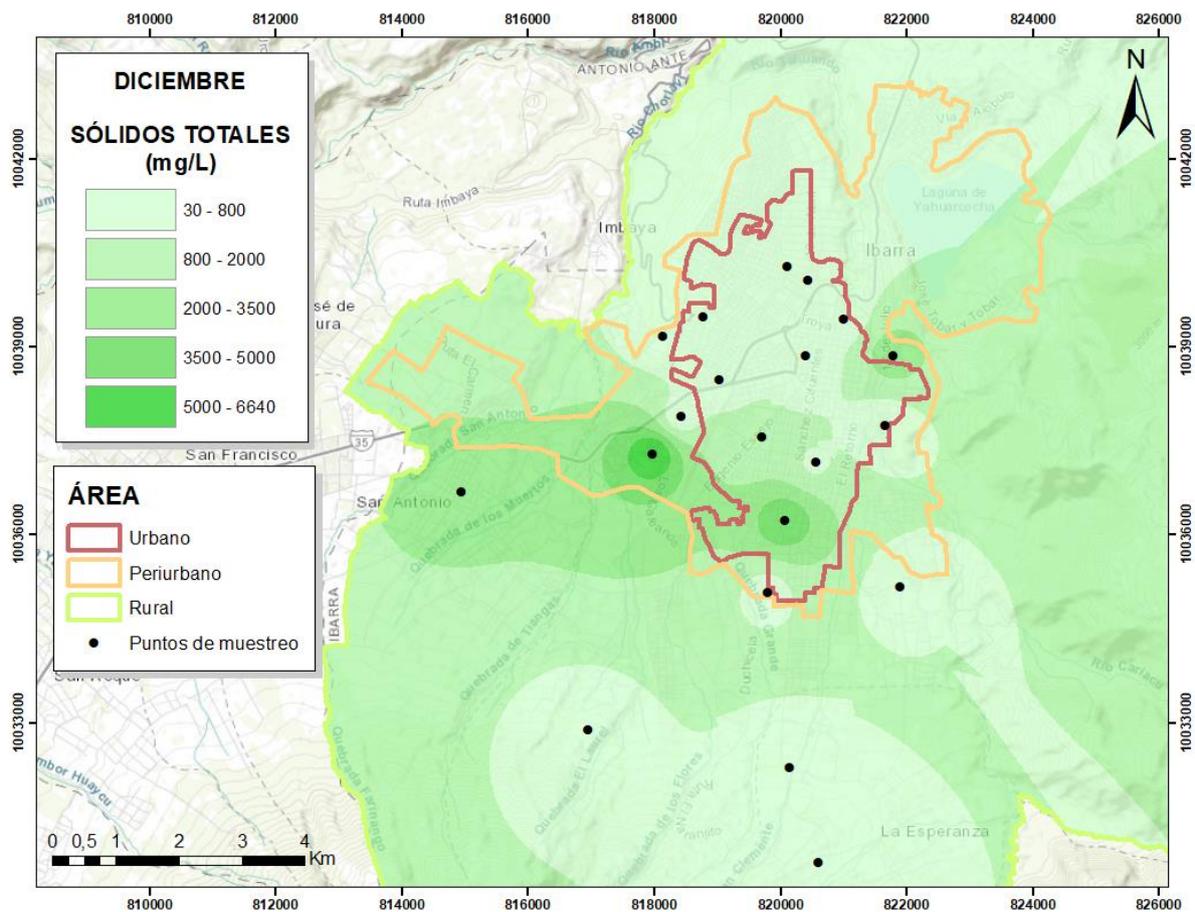


Durante el mes de noviembre de 2024, las concentraciones de sólidos totales (ST) en el agua de lluvia recolectada presentaron una distribución espacial diferenciada según la zona de muestreo. Los valores oscilaron entre 60 mg/L y 280 mg/L, con una mediana general de 100 mg/L, evidenciando una variabilidad moderada en la carga de material particulado disuelto.

Durante el mes de noviembre, las concentraciones de sólidos disueltos reflejaron una clara gradiente de urbanización, siendo la zona urbana la más afectada, con valores que oscilaron entre 100 y 280 mg/L. Esta mayor carga de partículas puede atribuirse a la acumulación de contaminantes atmosféricos derivados del tránsito vehicular, emisiones residenciales y actividades comerciales propias de áreas densamente pobladas. La zona periurbana presentó valores intermedios, lo cual es coherente con su condición de interfaz entre lo rural y lo urbano, donde confluyen fuentes emisoras de ambos entornos. En contraste, los valores más bajos fueron registrados en la zona rural (60 mg/L), lo que evidencia una menor presión antrópica directa y una atmósfera más limpia. Este patrón coincide con lo descrito por Garcés y Hernández (2004), quienes señalan que los niveles de contaminantes están directamente asociados al grado de actividad industrial y urbana, siendo las precipitaciones un reflejo de esa carga acumulada que, al ser arrastrada, permite su medición y análisis ambiental (Gongález, 2018).

Este comportamiento es coherente con lo planteado por Duque (2020), quien señala que, en zonas andinas, las primeras precipitaciones del periodo lluvioso suelen arrastrar partículas acumuladas durante la época seca, especialmente en entornos urbanizados. Asimismo, destacan que la presencia de sólidos disueltos en el agua de lluvia está determinada por factores como el tipo de cobertura del suelo, la intensidad del viento y el nivel de urbanización, todos ellos presentes de forma más marcada en zonas densamente pobladas. (Flores & Bonilla, 2010).

Figura 11 *Mapa de distribución de sólidos totales del mes de diciembre año 2024*



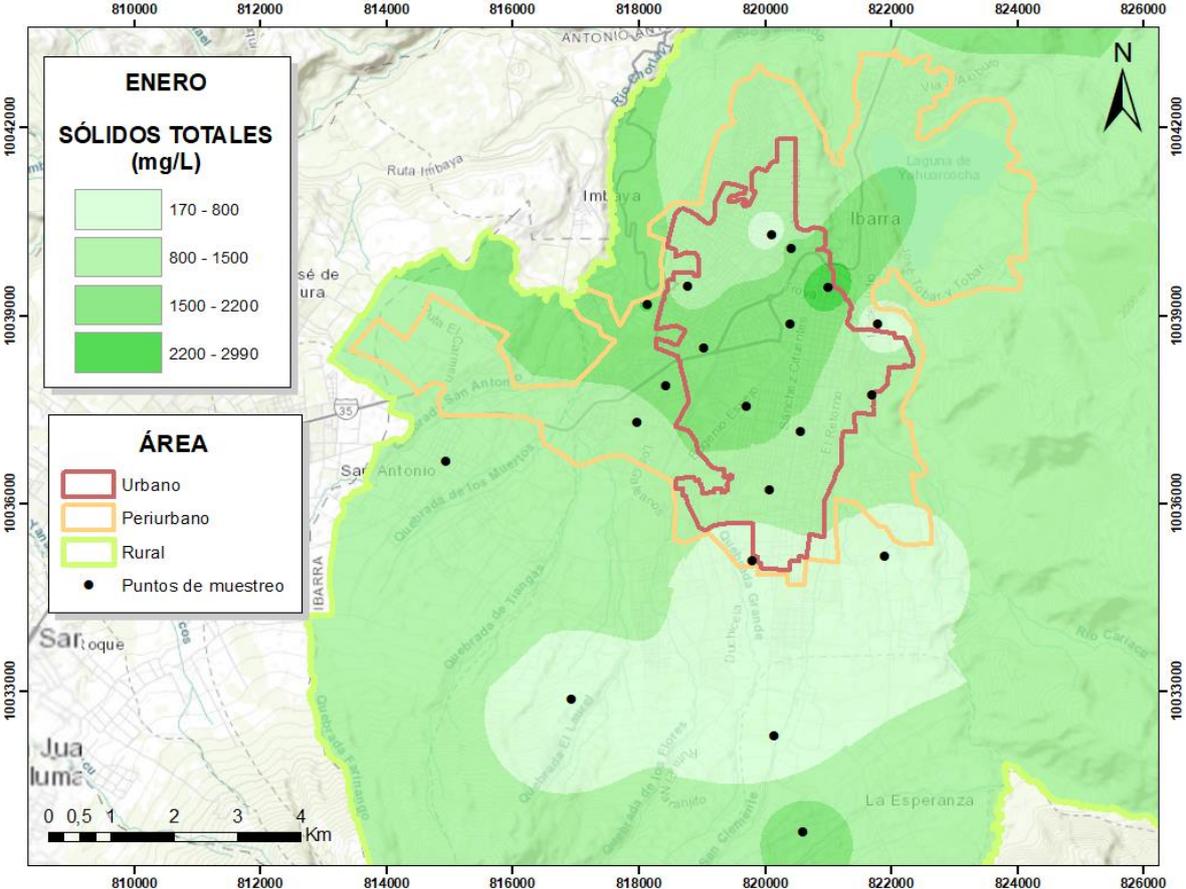
Durante diciembre de 2024, las concentraciones de sólidos totales (ST) en el agua de lluvia recolectada presentaron una marcada variabilidad espacial, con valores que oscilaron entre 30 mg/L y 6640 mg/L, y un valor promedio general de 1068 mg/L, indicando una carga significativa de partículas disueltas en ciertos sectores del área de estudio.

Las zonas rurales registraron valores bajos, con concentraciones entre 30 y 180 mg/L, lo que evidencia una menor influencia de actividades antrópicas. En contraste, las zonas urbanas presentaron los valores más altos, alcanzando hasta 6640 mg/L, con una media que superó los 1900 mg/L, reflejando una mayor emisión de partículas asociadas al tránsito, edificaciones y actividad humana intensa. Las zonas periurbanas mostraron una gama intermedia, con valores que variaron entre 250 y 2280 mg/L, consecuencia de la interacción entre fuentes rurales y urbanas.

Este patrón confirma el efecto del gradiente de urbanización sobre la calidad de la lluvia, en concordancia con lo indicado por Chaves-Solano et al (2021), quienes atribuyen las altas

concentraciones de sólidos totales en áreas urbanas a la acumulación de partículas provenientes de fuentes móviles y fijas, como vehículos, construcciones y emisiones domésticas en conjunto, los datos evidencian que la urbanización intensifica la carga de sólidos en el agua lluvia, mientras que las áreas rurales conservan una calidad más próxima a condiciones naturales.

Figura 12 Mapa de distribución de sólidos totales del mes de enero año 2025



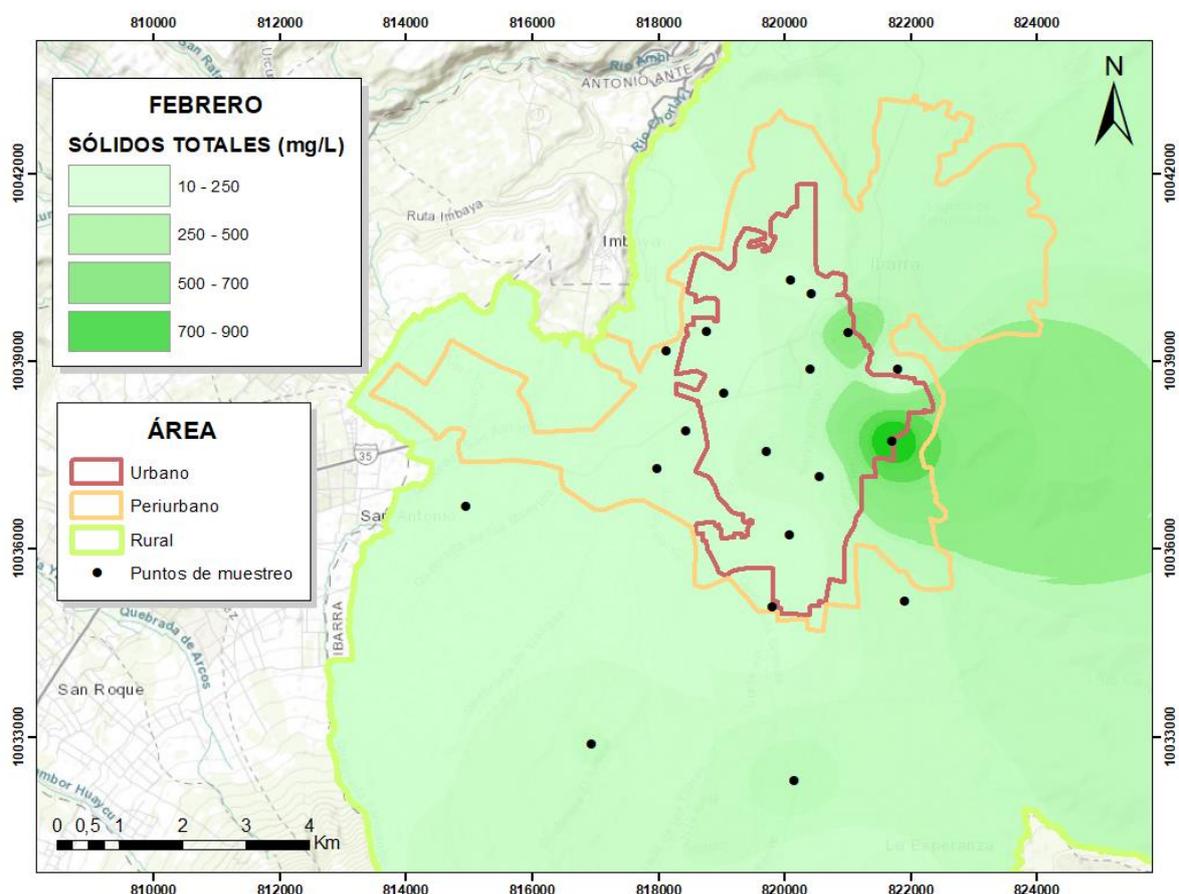
Durante el mes de enero de 2025, los sólidos totales (ST) en el agua lluvia presentaron una alta variabilidad espacial, con valores que oscilaron entre 170 mg/L y 2990 mg/L, y un promedio general de 1207,5 mg/L. La mayor concentración se registró en una zona urbana, evidenciando la persistencia de una carga significativa de material particulado en estas áreas. Otras zonas urbanas también alcanzaron concentraciones superiores a 2000 mg/L.

En las zonas rurales los valores se mantuvieron relativamente bajos, entre 220 y 420 mg/L, mientras que, en los sectores periurbanos, las concentraciones oscilaron entre 250 y 2170 mg/L, reflejando una condición intermedia. Estas diferencias evidencian un patrón espacial

marcado por el tipo de uso de suelo y nivel de actividad antrópica. La acumulación de sólidos en las zonas urbanas continúa destacando el impacto de las dinámicas humanas sobre la composición química de la lluvia. Chaves-Solano et al. (2021)

Asimismo, la interacción de factores como cobertura del suelo y viento mantiene su incidencia en la incorporación de partículas al agua de precipitación (Carrera-Oscullo et al., 2021).

Figura 13 Mapa de distribución de sólidos totales del mes de febrero año 2025



Durante el mes de febrero de 2025, los sólidos totales (ST) disueltos en el agua de lluvia mostraron una significativa reducción respecto a los meses anteriores, registrando un promedio general de 155 mg/L, el valor más bajo de toda la serie mensual analizada. Las concentraciones variaron entre 10 mg/L y 900 mg/L, lo que refleja una menor carga de material particulado arrastrado por la lluvia en este período.

Las lluvias intensas actúan como un barrido natural de partículas, limitando la acumulación prolongada de contaminantes atmosféricos y reduciendo su incorporación al agua de lluvia. Flores y Bonilla (2010) menciona que, en zonas tropicales y andinas, la pluviosidad no solo limpia la atmósfera, sino que también disminuye las emisiones temporales al restringir actividades como la quema de residuos, el tránsito vehicular y la circulación de polvo.

En términos espaciales, las zonas rurales registraron concentraciones especialmente bajas, con valores de hasta 10 mg/L, evidenciando un ambiente menos expuesto a fuentes fijas de contaminación. En contraste, algunas muestras de zonas urbanas presentaron ligeros picos de concentración (como los 900 mg/L), posiblemente asociados a emisiones vehiculares o depósitos acumulados en infraestructura urbana. Las zonas periurbanas mantuvieron una distribución moderada, con valores en el rango de 100 a 380 mg/L, sin extremos significativos.

Estudios como el de Duque (2020) señalan que estos patrones están influenciados por el grado de exposición del suelo, el tipo de cobertura vegetal y las condiciones meteorológicas, factores que modifican la dinámica de deposición y escorrentía en cada entorno. En regiones donde la urbanización avanza sobre zonas rurales, las lluvias cumplen además una función de autodepuración atmosférica temporal, regulando la concentración de materiales suspendidos en el aire.

4.2.3 Distribución de sólidos disueltos de acuerdo con los meses de estudio

Durante noviembre, se registró un valor promedio de sólidos disueltos de 144,29 mg/L, destacando una concentración relativamente alta. Este valor puede estar asociado a la acumulación de compuestos solubles por efecto del arrastre de partículas tras periodos secos y a la influencia de actividades humanas cercanas a las zonas de muestreo.

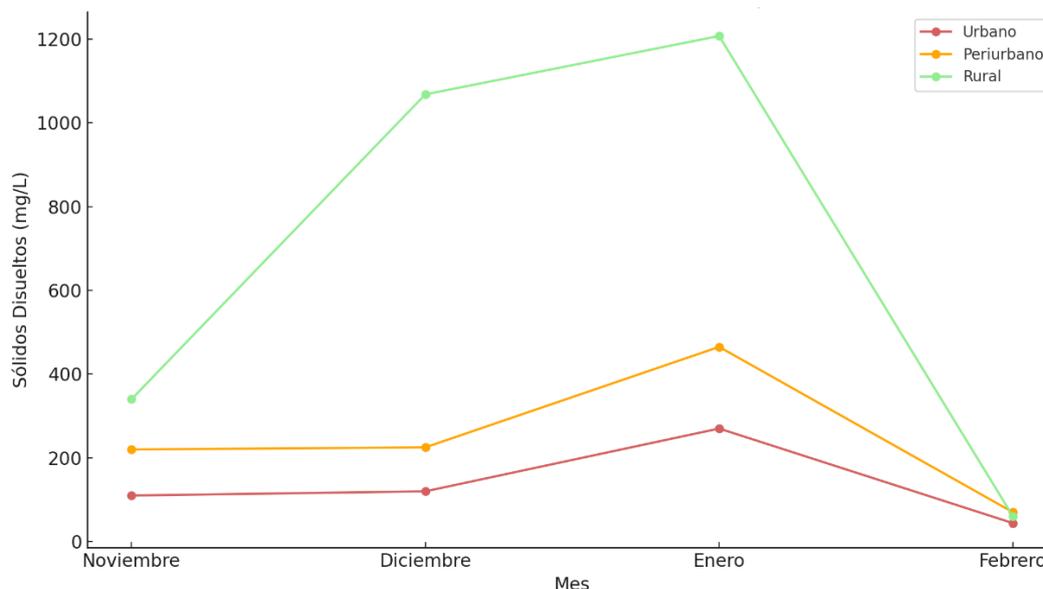
En diciembre, el promedio se elevó considerablemente a 225 mg/L, posiblemente debido a una mayor concentración de contaminantes en el aire durante esta época del año, ya sea por disminución de lluvias continuas o aumento de fuentes emisoras, como tráfico o actividades industriales.

Durante el mes de enero se registró la mayor concentración promedio de sólidos disueltos (465 mg/L), lo que refleja una carga significativa de materiales solubles arrastrados por las primeras

lluvias del año. Este fenómeno puede explicarse por el efecto de lavado atmosférico, en el cual las precipitaciones iniciales movilizan partículas acumuladas en superficies urbanas, vías asfaltadas e infraestructuras industriales. Dicho comportamiento es coherente con lo expuesto por Garcés y Hernández (2004), quienes afirman que la lluvia funciona como un mecanismo eficiente para transportar los contaminantes atmosféricos hacia la superficie terrestre, especialmente cuando estos han permanecido acumulados durante períodos secos, generando así un pico de carga química en las primeras lluvias del ciclo (Gongález, 2018).

En contraste, febrero mostró un fuerte descenso, con un promedio de apenas 44 mg/L, indicando una posible estabilización de las condiciones atmosféricas o una menor acumulación previa de contaminantes solubles, reflejando una atmósfera más limpia o una mayor frecuencia de lluvias depuradoras.

Figura 14 Variación mensual de los sólidos disueltos por zonas en el cantón Ibarra por agua lluvia



Nota. Se observa un aumento progresivo de los sólidos disueltos desde noviembre hasta enero, especialmente marcado en la zona rural. En febrero, los valores disminuyen significativamente en todas las zonas. Esto sugiere una acumulación estacional de contaminantes y una posterior depuración atmosférica.

4.2.4 Validación de Datos en Condiciones de Precipitación

Durante el período de estudio, los valores promedio de pH oscilaron entre 6,6 y 7,2, indicando una condición de precipitación neutra o ligeramente alcalina en todas las zonas (urbana, periurbana y rural). Este rango supera el umbral de 5,6, valor considerado como límite

para la identificación de lluvia ácida (Fierro, 2010). Por tanto, no se evidenciaron condiciones de acidez significativa en las precipitaciones analizadas.

La conductividad eléctrica, que representa la cantidad de iones disueltos en el agua, presentó valores bajos a moderados en la mayoría de las zonas, lo cual refuerza la ausencia de una carga iónica excesiva que podría estar relacionada con procesos de acidificación. En casos donde la conductividad fue más elevada, especialmente en zonas periurbanas, se interpretó como producto de aportaciones antrópicas locales (emisiones vehiculares, actividades agrícolas), sin que ello implique necesariamente una disminución del pH.

Por otra parte, los análisis de sulfatos y nitratos no arrojaron concentraciones detectables durante el período de muestreo. Esta ausencia se atribuye a dos factores: la baja concentración real de estos compuestos en la atmósfera local y el límite de detección del equipo utilizado, lo que sugiere que, en condiciones normales, la atmósfera de Ibarra no presenta una carga química suficiente para generar procesos de acidificación relevantes.

En conjunto, la evaluación de estos parámetros permite concluir que las condiciones atmosféricas en el cantón Ibarra durante el período de análisis corresponden a un régimen de precipitación neutra, sin evidencias de contaminación ácida. Esta situación puede explicarse por la frecuencia de lluvias, que facilita el lavado atmosférico, y por una menor densidad industrial y vehicular en comparación con ciudades de mayor tamaño. (Carrera et al., 2021)

La validación de los datos recolectados es fundamental para garantizar la calidad y fiabilidad de los resultados obtenidos durante el monitoreo de la composición química de la precipitación. En el caso del cantón Ibarra, durante el periodo noviembre 2024 – febrero 2025, los valores de pH se mantuvieron dentro de un rango cercano a la neutralidad (6,1 a 8,9), sin evidencias consistentes de lluvia ácida. Esto implica que los procesos de validación deben ajustarse a un escenario de baja acidez atmosférica, pero con presencia de otras variables que pueden influir en la calidad del agua de lluvia, como sólidos disueltos y carga iónica.

Coherencia espacial y temporal

Se validaron los patrones espaciales y estacionales observados, comprobando que las zonas urbanas presentan mayores cargas iónicas y valores elevados de sólidos totales, mientras que las zonas rurales tienden a registrar niveles bajos y estables. Estos patrones se mantuvieron consistentes entre los meses, lo que sugiere robustez en la distribución de los datos.

4.3 Propuesta de estrategias de monitoreo continuo y mantenimiento de niveles

4.3.1 Implementación de un Sistema de Monitoreo Permanente

La implementación de un sistema de monitoreo constante en el cantón Ibarra se desarrolló con un enfoque integral, considerando la identificación de puntos críticos de vulnerabilidad, el análisis de datos meteorológicos y la influencia de factores indirectos como la agricultura, la industria, la contaminación poblacional y los sectores urbanos más contaminados. Este sistema fue diseñado para evaluar mensualmente los niveles de pH, como principal indicador de la acidez de la lluvia, permitiendo mapear las zonas afectadas y facilitar la toma de decisiones para mitigar sus impactos.

Identificación de áreas vulnerables

Se seleccionaron puntos estratégicos en las zonas urbana, periurbana y rural, basados en los análisis previos de sólidos totales, conductividad eléctrica y pH. Estas áreas incluyeron:

- **Zonas urbanas:** Sectores con alta densidad poblacional e intensa actividad antropogénica, como el tráfico vehicular y las emisiones industriales.
- **Zonas periurbanas:** Áreas con interacción mixta entre fuentes urbanas y rurales, donde la dispersión de contaminantes influye significativamente.
- **Zonas rurales:** Áreas menos afectadas directamente, pero susceptibles a la deposición de contaminantes transportados por el viento (Quintar et al., 2010).

Monitoreo mensual de pH

El pH fue seleccionado como el principal parámetro de análisis debido a su capacidad para determinar la acidez de la lluvia de manera directa y eficiente. Se realizaron mediciones mensuales en los puntos identificados, utilizando equipos portátiles y estaciones de monitoreo automatizadas. Estos datos permitieron:

- Evaluar la variación estacional de la acidez de la lluvia.
- Identificar tendencias de aumento o disminución de pH en relación con los patrones meteorológicos.
- Comparar los niveles de acidez entre zonas urbanas, periurbanas y rurales (Vélez et al., 2010).

Mapeo para la toma de decisiones

Los datos recolectados se integraron en mapas de vulnerabilidad que representaron la distribución de pH en el cantón Ibarra.

- Zonas con mayor acidez (pH más bajo), destacando las áreas urbanas como las más críticas.
- Sectores periurbanos con vulnerabilidad moderada debido a la influencia de contaminantes transportados.
- Áreas rurales con menor afectación directa, pero con impacto a largo plazo debido a la deposición de contaminantes (Quintar et al., 2010).

Análisis de capas y datos meteorológicos

Se utilizó un enfoque basado en Sistemas de Información Geográfica (SIG) para integrar los datos de pH con capas de información geográfica, como:

- **Datos meteorológicos:** Dirección y velocidad del viento, intensidad y frecuencia de las precipitaciones.
- **Fuentes de contaminación:** Localización de industrias, áreas agrícolas, zonas de alta densidad poblacional y principales vías de tránsito.
- **Distribución geográfica:** Mapas detallados que superpusieron los niveles de pH con los factores ambientales y antropogénicos.

El viento fue identificado como un factor clave en la dispersión de contaminantes. Las mediciones meteorológicas permitieron analizar cómo las corrientes de aire trasladaron partículas desde las zonas urbanas hacia las áreas periurbanas y rurales, aumentando la afectación en estas últimas. Este análisis ayudó a predecir áreas potenciales de impacto y a

diseñar estrategias para reducir la emisión de contaminantes en las fuentes principales (Duque, 2020).

4.3.2 Fortalecimiento de capacidades institucionales para la gestión de calidad del aire

Una estrategia complementaria al monitoreo permanente es el fortalecimiento institucional, mediante la capacitación de personal técnico, la dotación de equipos calibrados y la creación de protocolos estandarizados para la recolección, análisis y reporte de datos de lluvia. Esta medida permitiría garantizar la continuidad y confiabilidad de los registros a largo plazo, así como la generación de alertas tempranas en caso de detectar eventos de acidez elevados o variaciones críticas en parámetros como el pH, conductividad y sólidos. Tal como se evidenció en Manizales, donde el 79 % de los eventos entre marzo y julio presentó $\text{pH} < 5,6$, el monitoreo sistemático permitió justificar la necesidad de políticas sobre calidad del aire orientadas al control de óxidos de nitrógeno y azufre (Vélez et al., 2010). En este contexto, una red local fortalecida no solo mejora la toma de decisiones ambientales, sino que posiciona a los municipios como actores activos en la prevención de la lluvia ácida y la protección de los ecosistemas.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Durante el periodo comprendido entre noviembre de 2024 y febrero de 2025, los valores de pH en las precipitaciones del cantón Ibarra se mantuvieron entre 6,1 y 8,9, por lo tanto, no se evidenció la presencia de lluvia ácida. Esta condición puede explicarse por la baja densidad industrial y vehicular, así como por la frecuencia de lluvias que contribuyó al lavado atmosférico y a la reducción de contaminantes en suspensión, lo que permitió mantener una calidad aceptable en el agua de lluvia.

En cuanto a la distribución espacial de los parámetros fisicoquímicos, se observó una mayor concentración de contaminantes en las zonas urbanas y periurbanas, mientras que las zonas rurales presentaron condiciones más estables. Esto demuestra que el grado de urbanización influye directamente en la calidad de las precipitaciones, debido a la presencia de fuentes emisoras como el tráfico vehicular, el uso de fertilizantes y la quema de residuos, factores que alteran la composición química del agua atmosférica.

Aunque no se registraron niveles críticos de acidez, se identificaron variaciones estacionales en la conductividad eléctrica y los sólidos disueltos, con un pico en enero, lo cual sugiere momentos de mayor vulnerabilidad atmosférica. Por ello, resulta fundamental establecer un sistema de monitoreo continuo que permita detectar estas fluctuaciones, identificar zonas sensibles y promover acciones preventivas para mantener la calidad del ambiente y proteger la salud pública.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda implementar un sistema de monitoreo continuo del pH, conductividad y sólidos en lluvia, con estaciones distribuidas en zonas urbanas, periurbanas y rurales, a fin de detectar variaciones y prevenir posibles procesos de acidificación.

Es necesario fortalecer la educación ambiental en sectores más intervenidos del cantón, promoviendo buenas prácticas que reduzcan emisiones contaminantes, como el control del tránsito, la gestión de residuos y la reducción de quemas.

Se sugiere replicar este estudio en diferentes épocas del año y en otros cantones de la provincia, con el propósito de comparar resultados, establecer patrones regionales y mejorar la planificación ambiental a nivel territorial.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, N., Coáguila, L., López, K., Huánuco, L., & Quispe, P. (2016). *Lluvia Ácida*. Universidad San Ignacio de Loyola.
- Aimacaña, F. (2016). *Determinación del Impacto de la Lluvia Ácida en Tres Sectores (Norte, Centro y Sur) de la Ciudad de Latacunga Período 2015*. Universidad Técnica de Cotopaxi.
- Anrango, S. (2019). *Zonificación de Cobertura Vegetal Propensa a Incendios en el Catón Ibarra, Provincia de Imbabura*. Universidad Técnica del Norte .
- Arias, A. (2023). *El fenómeno de la lluvia ácida como estrategia para el aprendizaje de la química y el desarrollo de la competencia científica explicación de fenómenos*. Universidad Nacional de Colombia.
- Asamblea Nacional del Ecuador. (2021). *Código Orgánico Integral Penal, COIP*. www.lexis.com.ec
- Bravo, H., Soto, R., Sosa, R., Sánchez, P., Alarcón, A. L., & Ruíz, J. (2003). Degradación del material pétreo de la zona arqueológica de El Tajín, Veracruz, México, por efecto de la lluvia ácida. In *Revista de la Sociedad Química de México* (Vol. 47, Issue 4).
- Burns, D. A., Aherne, J., Gay, D. A., & Lehmann, C. M. B. (2016). Acid rain and its environmental effects: Recent scientific advances. In *Atmospheric Environment* (Vol. 146, pp. 1–4). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.10.019>
- By, R., Knippers, R., Sun, Y., Ellis, M., Kraak, M., Weir, M., Georgiadou, Y., Radwan, M., Westen, C., Kainz, W., & Edmund, S. (2001). *Principles of Geographic Information Systems*. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences.
- Carrera Oscullo, P. D., Vaca Álvarez, L. S., Segura Chávez, E. O., & Taco Ugsha, M. A. (2021). Análisis de lluvia ácida en la ciudad de Nueva Loja, provincia de Sucumbíos. *Green World Journal*, 4(3), 002. <https://doi.org/10.53313/gwj43002>
- Carrera, P., Vaca, L., Segura, E., & Taco, M. (2021). Análisis de lluvia ácida en la ciudad de Nueva Loja, provincia de Sucumbíos. *Green World Journal*, 4(3), 002. <https://doi.org/10.53313/gwj43002>
- Chaves-Solano, K. D., Sibaja-Brenes, J. P., & Pérez-López, E. (2021). Monitoreo de la concentración de SO₂ en el aire y características fisicoquímicas del agua de lluvia en el Volcán Irazú. *Revista Tecnología En Marcha*. <https://doi.org/10.18845/tm.v34i4.5113>
- Chen, X., Shan, X., Shi, Z., Zhang, J., Qin, Z., Xiang, H., & Wei, H. (2021). Analysis of the Spatio-temporal Changes in Acid Rain and Their Causes in China (1998-2018). *Journal*

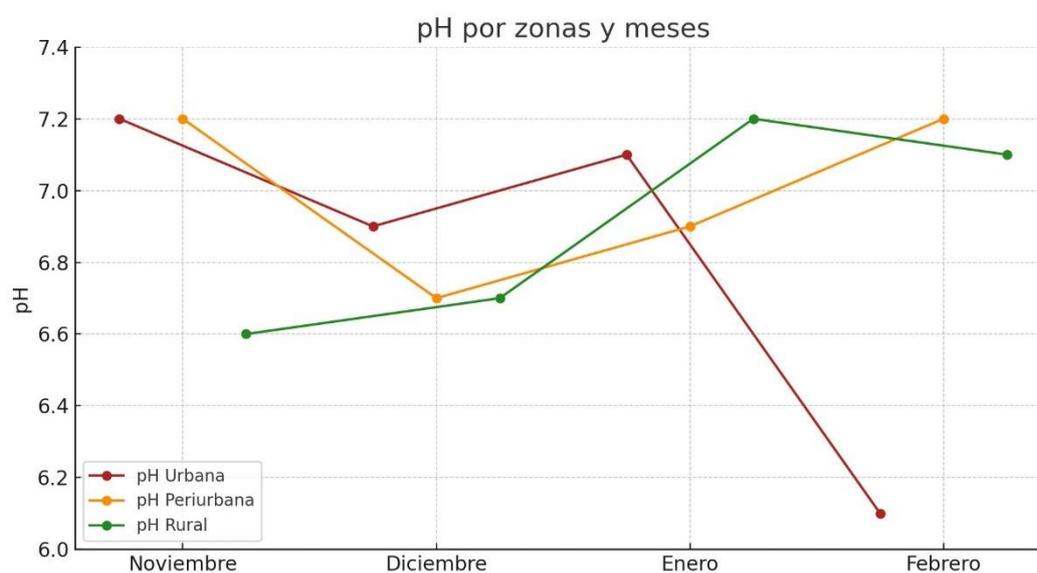
- of Resources and Ecology*, 12(5), 593–599. <https://doi.org/10.5814/j.issn.1674-764x.2021.05.002>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2024). *Definición de Población Urbana y Rural Utilizadas en los Censos de los Países Latinoamericanos*.
- Consejo Municipal de Ibarra. (2012). *Ordenanza para la Protección en lo Relativo a la Contaminación por Desechos no Domésticos Generados por Fuentes Fijas del Cantón Ibarra*.
- Duque, G. (2020). *Colombia- Dinámicas del clima Tropical Andino*. 2–15. <https://www.researchgate.net/publication/41309251>
- Fierro, E. (2010). *Características ácido-básicas y composición iónica de las lluvias en la Reserva Biológica Limoncocha-Ecuador*.
- Flores, R., & Bonilla, P. (2010). Perfil de la Lluvia Ácida en la Ciudad de Quito Durante los Meses de Diciembre-2008 y Enero-2009. *Revista de La Facultad de Ciencias Químicas de La Universidad Central*, 01, 27–34.
- Fortin, M.-J., & Dale, M. (2009). Spatio-Temporal Analysis. In *Spatial Analysis* (pp. 256–316). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511542039.007>
- Garcés, L., & Hernández, M. (2004). La Lluvia Ácida: Un Fenómeno Físicoquímico de Ocurrencia Local. *Revista Lasallista de Investigación*, 1(1794–4449), 67–72.
- Giraldo, M., González, C., Moreno, M., Mariscal, P., Lodoño, J., & Upegui, J. (2018). *Diagnóstico y Análisis Del Comportamiento de la Lluvia Ácida en la Ciudad de Manizales*.
- Gongález, G. (2018). Incidencia de la Lluvia Ácida como Factor de la Calidad del Aire en la Productividad Agrícola del Suelo. *Boletín Semillas Ambientales*, 12(2463–0691), 39–47.
- Granados, D., López, F., & Hernández, M. (2010). La Lluvia Ácida y los Ecosistemas Forestales. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, XVI(2), 187–206. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.04.022>
- Instituto Nacional de Hidrología y Meteorología-INAMHI. (2021). *Plan Estratégico INAMHI 2021-2025*. <https://www.inamhi.gob.ec/>
- Li, Wang, Tang, Goulding, Zheng, & Liu. (2022). Spatio-Temporal Characteristics and Source Apportionment of Water-Soluble Organic Acids in PM_{2.5} in the North China Plain. *Atmospheric Pollution Research*, 13(9). <https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101540>

- Li, Wumaier, & Ishikawa. (2019). The spatial analysis and sustainability of rural cultural landscapes: Linpan settlements in China's Chengdu Plain. *Sustainability (Switzerland)*, 11(16). <https://doi.org/10.3390/su11164431>
- Ministerio del Ambiente. (2017). *Código Orgánico Administrativo - Segundo Suplemento*.
- Ministerio del Ambiente Agua y Transición Ecológica. (2017). *TEXTO UNIFICADO DE LEGISLACION SECUNDARIA DE MEDIO AMBIENTE*. www.lexis.com.ec
- Organización de las Naciones Unidas. (2022). *Objetivos y metas de desarrollo sostenible*.
- Pabón, G. (2010). *Estudio del nivel de contaminación por emisiones gaseosas de fuentes fijas en la ciudad de Ibarra y elaboración de la Propuesta de Plan de Manejo*.
- Plan De Desarrollo Y Ordenamiento Territorial del Cantón Ibarra. (2023). *Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal De San Miguel De Ibarra*.
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2010). *Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes*.
- Quintar, S., González, P., Almeida, C., González, O., & Mallea, S. (2010). *Lluvia Ácida*.
- Rodríguez, P. (2019). *Estudio Piloto para el Diagnóstico de Lluvia Ácida en la Ciudad de Cali*.
- Sarochar, R., Ciappesoni, H., & Ruiz, E. (2005). *Convective And Stratiform Precipitation in the Humid Pampas: A Separation Approach and Climatological Aspects*. 30, 77–88.
- Scheiber, V. L., Méndez, C. M., & Ares, A. E. (2015). Analysis of corrosion resistance in simulated acid rain of Zn-Sn alloys. *Revista Materia*, 20(3), 597–611. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620150003.0061>
- Secretaría Nacional de Planificación. (2024). *Plan de Desarrollo Para el Nuevo Ecuador 2024-2025*.
- Sosa-Echeverría, R., Bravo-álvarez, H., Alarcón-Jiménez, A. L., Torres-Barrera, M. del C., Jaimes-Palomera, M., Sánchez-álvarez, P., & Granados-Hernández, E. (2018). Acid rain in a Mexican site on the coast of the Gulf of Mexico. *Atmosfera*, 31(4), 317–330. <https://doi.org/10.20937/ATM.2018.31.04.01>
- Torres, T. (2021). *Análisis Espacio-Temporal de los Niveles de pH de la Lluvia Ácida en la Ciudad de Quito en el Periodo 2016 – 2020*. Universidad Internacional SEK.
- Vélez, J., Valencia, M., Londoño, A., González, C., & Mariscal, J. (2010). *Contaminación del Aire y Lluvia Ácida (Primera)*.
- Yang, G., & Li, G. (2022). MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE AFTER ACID RAIN CORROSION BASED ON PARTICLE DISCRETE ELEMENT. *Revista*

ANEXOS

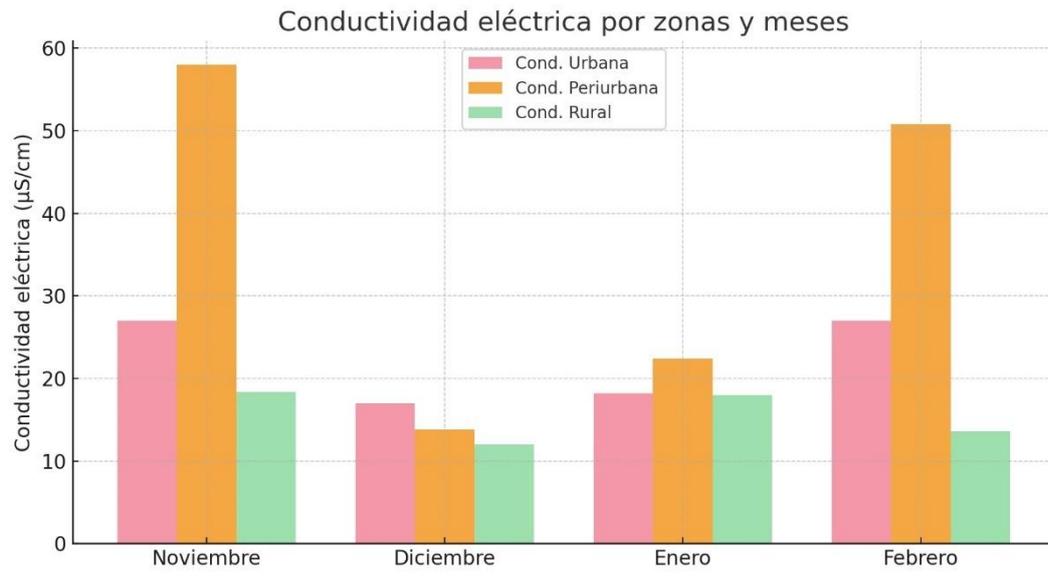
Anexo 1

Variación estacional del pH en el cantón Ibarra del agua lluvia



Anexo 2

Variación Estacional de la conductividad eléctrica en el cantón Ibarra del agua lluvia



Anexo 3

Trabajo de pesaje en el laboratorio de la UTN



Anexo 4

Datos pH según la zona

pH	
NOVIEMBRE	
Zonas	Promedio
Urbana	7,214444444
Periurbana	7,24
Rural	6,62

DICIEMBRE	
Zonas	Promedio
Urbana	6,849666667
Periurbana	6,713333333
Rural	6,682666667

ENERO	
Zonas	Promedio
Urbana	7,048666667
Periurbana	6,936
Rural	7,14

FEBRERO	
Zonas	Promedio
Urbana	6,143666667
Periurbana	7,354666667
Rural	7,102

Anexo 5

Datos de la conductividad eléctrica según las zonas

Conductividad	
NOVIEMBRE	
Zonas	Promedio
Urbana	27
Periurbana	58
Rural	18,33333333

DICIEMBRE	
Zonas	Promedio
Urbana	16,5
Periurbana	13,8
Rural	12

ENERO	
Zonas	Promedio
Urbana	18,2
Periurbana	22,4
Rural	18

FEBRERO	
Zonas	Promedio
Urbana	27
Periurbana	50,8
Rural	13,6

Anexo 6

Coordenadas UTM de las zonas de estudio

Número de puntos	Zona	Coordenadas UTM
1	Periurbano	817973.18E 37283.87N
2	Urbano	0.327272, -78.124793
3	Urbano	0.350085, -78.109492
4	Urbano	0.335703, -78.120435
5	Urbano	820423E 40061N
6	Urbano	820392.52E 38868.49N
7	Urbano	820095.15E 40284.63N
8	Periurbano	821002.61E 39451.99N
9	Periurbano	819791.54E 35074.37N
10	Periurbano	818425.55E 37882.82N
11	Periurbano	810525.68E 45649.42N
12	Urbano	819026.59E 38482.53N
13	Rural	821891E 35165N
14	Urbano	819703.99E 37553.00N
15	Rural	816933.53E 32879.03N
16	Urbano	821700.23E 37722.41N
17	Rural	820147.00E 32287.00N
18	Rural	814938.94E 36678.90N
19	Rural	820594E 30756N
20	Urbano	819375.00E 40424.00N

Anexo 7

Datos de recolección ph y temperatura

NOVIEMBRE									
	PH					Temperatura (°C)			
N° de muestra	1	2	3	Total		1	2	3	Total
1	7,28	7,23	7,21	7,24		23,5	23,8	24,5	23,93333
2	7,31	6,85	6,76	6,973333		22,5	22,5	22,7	22,56667
13	6,69	6,61	6,60	6,633333		23,6	23,7	23,7	23,66667
15	6,86	6,77	6,75	6,793333		23,5	23,6	23,6	23,56667
16	7,66	7,71	7,72	7,696667		23,6	23,7	23,8	23,7
19	6,53	6,39	6,38	6,433333		23,6	23,6	23,6	23,60
20	7,31	6,85	6,76	6,973333		22,5	22,5	22,7	22,57
PROMEDIO				6,963333		23,37143			
DICIEMBRE									
	PH					Temperatura			
N° de muestra	1	2	3	Total		1	2	3	Total
1	6,55	6,49	6,48	6,506667		23	23,8	23,9	23,56667
2	7,04	6,95	6,93	6,973333		23,2	23,3	23,6	23,36667
3	6,78	6,55	6,42	6,583333		23,1	23,1	23,4	23,2
4	7,04	6,95	6,93	6,973333		23,2	23,3	23,6	23,36667
5	6,74	7,00	6,86	6,866667		23	23,1	23,2	23,1
6	6,5	7,03	6,95	6,826667		23,5	23,5	23,7	23,56667
7	6,38	6,35	6,33	6,353333		23,6	23,8	24,1	23,83333
8	7,07	6,91	6,88	6,953333		22,4	22,4	22,5	22,43333

5	7,22	7,23	7,23	7,226667		21,7	21,7	21,9	21,76667
6	6,8	6,45	6,6	6,616667		20,4	21,1	21,6	21,03333
7	7,09	7,08	7,09	7,086667		20,7	20,8	21	20,83333
8	8,96	8,96	8,95	8,956667		21,3	21,5	21,7	21,5
9	5,66	5,7	6,1	7,55		22	21,81	21,6	21,80333
10	6,21	6,53	6,89	6,543333		20,1	19,7	19,9	19,9
11	7,3	7,55	7,8	7,55		22,4	22	21,8	22,06667
12	7,94	7,83	7,75	7,84		22,6	22,6	22,8	22,66667
13	7,05	6,86	6,79	6,9		23,1	23,2	23,4	23,23333
14	6,94	7	7,02	6,986667		19,3	19,3	19,4	19,33333
15	7,64	7,09	6,87	7,2		17,8	17,8	18	17,86667
16	7,02	7,05	7,07	7,046667		24,4	24,4	24,4	24,4
17	7,49	7,31	7,25	7,35		22,7	22,9	23	22,86667
18	6,89	7,01	7,05	6,983333		22,6	22,2	20,3	21,7
19	7,12	7,08	7,03	7,076667		21,8	22	19,4	21,06667
20	7,01	7,2	7,12	7,11		23,2	22,6	22,9	22,9

PROMEDIO

6,732833

20,5485

Anexo 8

Datos de SST, SDT y conductividad

Solidos Totales (mg/L)				Solidos Disueltos				Conductividad
Peso B	Peso A	Muestra (ml)	Total	Peso D	Peso C	Muestra (ml)	Total	
85,506	85,52	100	140	45,033	45,067	100	340	58
85,483	85,511	100	280	45,197	45,208	100	110	30
93,127	93,134	100	70	84,328	84,34	100	120	17
91,763	91,771	100	80	48,65	48,672	100	220	14
91,74	91,753	100	130	84,325	84,332	100	70	34
84,253	84,259	100	60	52,05	52,054	100	40	24
69,289	69,299	100	100	45,197	45,208	100	110	17
122,8571				144,2857				27,71428571
Solidos Totales (mg/L)				Solidos Disueltos				
Peso B	Peso A	Muestra (ml)	Total	Peso D	Peso C	Muestra (ml)	Total	Conductividad
67,095	67,759	100	6640	51,365	51,375	100	100	9
69,307	69,806	100	4990	48,641	48,654	100	130	16
90,656	90,951	100	2950	43,743	43,808	100	650	13
83,501	83,564	100	630	48,641	48,654	100	130	18
75,047	75,072	100	250	47,102	47,129	100	270	58
69,289	69,299	100	100	60,464	60,558	100	940	8
91,759	91,779	100	200	46,107	46,109	100	20	25
93,096	93,131	100	350	91,85	91,852	100	20	28
79,954	79,986	100	320	73,476	73,542	100	660	14

82,954	82,972	100	180		52,871	52,872	100	10		8
59,493	59,504	100	110		42,287	42,294	100	70		49
84,231	84,269	100	380		42,283	42,295	100	120		202
74,684	74,688	100	40		61,665	61,67	100	50		4
91,332	91,333	100	10		47,981	47,987	100	60		10
73,167	73,17	100	30		58,356	58,361	100	50		13
91,453	91,459	100	60		45,051	45,053	100	20		42
91,774	91,793	100	190		46,95	46,951	100	10		24
75,118	75,135	100	170		45,043	45,047	100	40		46
91,758	91,775	100	170		46,959	46,961	100	20		6
83,122	83,212	100	900		46,94	46,946	100	60		27
85,493	85,516	100	230		52,063	52,072	100	90		11
88,943	88,95	100	70		53,065	53,067	100	20		14
67,089	67,102	100	130		43,671	43,673	100	20		13
72,458	72,46	100	20		73,501	73,511	100	100		12

155

44

29,6

Anexo 9

Filtros con muestras de sólidos suspendidos



Nota. El anexo indica los filtros con muestras de agua lluvia de los sólidos suspendidos en los puntos de muestreo. Elaboración propia

Anexo 10

Muestras de sólidos suspendidos



Nota. El anexo indica las muestras de agua lluvia de los sólidos totales en los puntos de muestreo. Elaboración propia