

Trabajo Monográfico para optar al título de
Ingeniero Civil

“PROPUESTA DE REÚSO DEL EFLUENTE DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (STAR) DEL MUNICIPIO DE ESTELÍ PARA EL RIEGO DEL CULTIVO DE TABACO”

Elaborado por:

Br. Iliana Sarahí
López
Carnet: 2020-0340N

Br. Eduar Alí
González Rubio
Carnet: 2020-0077N

Br. Edgar Antonio
Morales Ruíz
Carnet: 2020-0216N

Tutor:

Ing. Oliver Josué
Rivera Gutiérrez

CURE-CONSECUTIVO
Estelí, 22 de agosto del 2025

Bachilleres
ILIANA SARAHÍ LÓPEZ
EDUAR ALÍ GONZÁLEZ RUBIO
EDGAR ANTONIO MORALES RUIZ

Estimado Bachiller:

Es de mi agrado informar que el PROTOCOLO de su Tema **MONOGRÁFICO**, titulado: **“PROPUESTA DE REÚSO DEL EFLUENTE DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (STAR) DEL MUNICIPIO DE ESTELÍ PARA EL RIEGO DEL CULTIVO DE TABACO”** ha sido aprobado por el director de Centro Universitario Regional Estelí.

Asimismo, les comunico estar totalmente de acuerdo, que el **ING. OLIVER JOSUÉ RIVERA GUTIÉRREZ** sea el tutor de su trabajo final.

La fecha límite, para que presenten concluido su documento final, debidamente revisado por el tutor guía será el **23 de febrero del 2026**.

Esperando puntualidad en la entrega de la Tesis, me despido.

Atentamente,


Arq. Jorge Pavel Valdivia García
Director de Centro Universitario Regional
CURE

Managua, 12 de enero, 2026

Arq. Jorge Pavel Valdivia García
Director Centro Universitario Regional – Esteli
Universidad Nacional de Ingeniería (UNI)
Su despacho

Estimado Maestro Valdivia, reciba cordial saludo, deseando éxito en sus labores.

El motivo de la presente es para informarle que los bachilleres: **Iliana Sarahí López, Eduar Ali González Rubio y Edgar Antonio Morales Ruiz**, han desarrollado bajo mi tutoría el tema titulado: **“PROPUESTA DE REÚSO DEL EFLUENTE DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (STAR) DEL MUNICIPIO DE ESTELÍ PARA EL RIEGO DEL CULTIVO DE TABACO”**, como requisito para optar al título de Ingeniero Civil.

Habiendo realizado una revisión detallada del documento final, cumpliendo con cada uno de los objetivos planteados, considero que reúne los requisitos necesarios para someterse a la pre- defensa, ante el tribunal examinador que esta dirección designe.

Sin nada más a que hacer referencia, me suscribo.

Cordialmente.



Ing. Oliver Josué Rivera Gutiérrez
Docente del Departamento de Ingeniería Civil
Área de Conocimiento de Arquitectura y Construcción
Universidad Nacional de Ingeniería

Cc. Archivo Cronológico 2026/ Sustentantes

AGRADECIMIENTO

A Dios, fuente de sabiduría, fortaleza y propósito. A Él encomiendo cada paso de este camino, porque en los momentos de incertidumbre fue su luz la que me sostuvo, y su gracia la que me permitió llegar hasta aquí con fe y esperanza.

A mi madre, cuya memoria vive en cada uno de mis logros. Aunque ya no esté físicamente a mi lado, su amor sigue siendo mi fuerza. Este logro es, ante todo, un reflejo de todo lo que ella sembró en mí.

A mi abuela materna, por ser mi pilar más firme, mi compañía constante y el reflejo del amor incondicional. Su apoyo, sus oraciones y su sabiduría han sido la base que me ha sostenido en los momentos más difíciles.

A mi familia, especialmente a mis tíos por su aliento, por sus palabras de ánimo y por recordarme siempre de dónde vengo. Cada gesto de apoyo, cada muestra de cariño y cada sacrificio compartido han tenido un significado en este proceso.

A mis compañeros de monografía, por su colaboración, esfuerzo y compañerismo; juntos demostramos que la constancia y la unión son la base del logro académico.

Al **Ing. Oliver Josué Rivera Gutiérrez**, mi tutor, por su orientación, su paciencia y su compromiso profesional durante el desarrollo de este trabajo.

Al **Ing. Eddy Wilfredo Montalván Lanzas**, por su apoyo excepcional, su entrega y por creer en mi potencial cuando más lo necesité.

A mis docentes, cuya vocación y enseñanza sentaron las bases de mi formación profesional y contribuyeron de manera significativa a mi crecimiento académico.

A mis amigos, por su presencia y fortaleza emocional en los momentos en que más lo necesité. Gracias por escucharme, por acompañarme y por recordarme que nunca estuve sola en este proceso. De manera muy especial, a **Edgar Antonio Morales Ruíz**, por su amistad sincera, su apoyo constante y por ser un sostén invaluable en las etapas más desafiantes de este camino.

Br. Iliana Sarahí López

AGRADECIMIENTO

A Dios, por acompañarme en este camino, por darme la fortaleza interior, la claridad y la guía necesarias para culminar con éxito una etapa tan significativa de mi formación académica.

A mis padres, quienes han sido el principal sostén de mi vida. Gracias por su entrega constante, su esfuerzo incansable y su apoyo incondicional. Los valores y principios que me han transmitido han sido fundamentales para avanzar con firmeza y alcanzar este logro.

A mis familiares, por estar presentes durante todo el proceso, brindándome ánimo, respaldo y confianza. Su acompañamiento y palabras oportunas fueron un estímulo permanente para continuar adelante.

A mis compañeros de este trabajo monográfico, por el compromiso, la colaboración y el trabajo en equipo demostrados. Gracias por la dedicación compartida, la perseverancia y el esfuerzo conjunto para alcanzar nuestros objetivos académicos y hacer de este proceso una experiencia más llevadera.

Al **Ing. Oliver Josué Rivera Gutiérrez**, por su asesoría, disposición y profesionalismo durante el desarrollo del trabajo, aportes que resultaron esenciales para su adecuada culminación.

Al **Ing. Eddy Wilfredo Montalván Lanzas**, por su apoyo, confianza y valiosas contribuciones, las cuales enriquecieron de manera significativa este proceso académico.

Finalmente, a mis docentes, quienes a través de su vocación, conocimientos y enseñanzas aportaron de forma decisiva a mi formación profesional y académica.

Br. Eduar Ali González Rubio

AGRADECIMIENTO

Primeramente, agradezco a Dios, por ser mi guía en cada paso de este camino, por darme la fortaleza, la sabiduría y la perseverancia necesarias para culminar esta etapa tan importante de mí y formación académica.

A mi padre, mi ejemplo de superación, fortaleza y perseverancia. Gracias por enseñarme que los sueños se construyen con sacrificio, esfuerzo y dignidad. Tu lucha diaria, tus consejos y tu forma de enfrentar la vida han sido mi mayor inspiración para no rendirme y seguir avanzando.

A mi madre, mi refugio y mi mayor apoyo. Gracias por tu amor incondicional, por tus desvelos, tu paciencia infinita y por creer en mí incluso cuando yo mismo dudaba. Tu cariño y tus palabras de aliento fueron el motor que me impulsó a continuar en los momentos más difíciles.

A mi hermana, por su compañía, comprensión y apoyo sincero, por ser un pilar importante en este proceso y una motivación constante para seguir adelante.

Agradezco de manera especial al **Ing. Oliver Rivera Gutiérrez**, mi tutor, por su orientación, su compromiso y conocimientos, fueron fundamentales para la correcta realización de esta monografía.

Al **Ing. Eddy Wilfredo Montalván Lanzas**, por su apoyo incondicional, su entrega como maestro y su valiosa contribución a mi formación académica y profesional.

A todos mis docentes, quienes han aportado conocimientos, que han sido esenciales en mi crecimiento académico y personal.

Finalmente, una mención especial a **Iliana Sarahí López**, por ser un apoyo fundamental en el del transcurso de mi carrera. Por brindarme su amistad y apoyo cuando más lo necesitaba. Tu acompañamiento fue clave para no rendirme y seguir adelante.

A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento y gracias por confiar siempre en mí.

Br. Edgar Antonio Morales Ruíz

DEDICATORIA

Este trabajo monográfico está dedicado, en primer lugar, a Dios, maestro eterno, origen de toda sabiduría y sentido. A Él entrego este logro como testimonio de que la fe sostiene, guía y fortalece aun cuando el camino parece incierto. Su presencia fue constante, incluso en los silencios, y su propósito dio dirección a cada paso recorrido.

De manera muy especial, dedico este logro a la memoria de mi madre, **Iliana Esther López Morazán**, quien sigue siendo la razón más profunda de cada uno de mis esfuerzos. Su amor, su entrega y su ejemplo trascendieron el tiempo y la ausencia, convirtiéndose en la base firme sobre la cual he construido mis sueños. Todo lo que soy y todo lo que he logrado nace de lo que ella sembró con sacrificio, ternura y fortaleza. Este trabajo no solo representa un logro académico, sino una forma de honrar su vida, su lucha y su amor eterno, que continúa acompañándome en cada paso.

A mi abuela maternal **Reina Catalina Morazán Herrera**, por ser refugio, firmeza y ejemplo de fortaleza. Su compañía incondicional, su fe y su entrega silenciosa han sido un sostén invaluable en los momentos más desafiantes de mi vida académica y personal.

A mi familia, quienes representan el respaldo constante, la identidad y el sentido de pertenencia. Su apoyo, aun en la distancia o en lo cotidiano, fue parte fundamental para no rendirme y continuar avanzando.

Dedico también este trabajo a mi tutor, **Ing. Oliver Josué Rivera Gutiérrez**, por su guía académica, su compromiso y su disposición para orientar este proceso con profesionalismo y criterio. Su acompañamiento fue clave para transformar ideas en conocimiento y esfuerzo en resultado.

Cada página escrita es el reflejo de muchas manos, muchas oraciones y muchos silencios convertidos en fortaleza. A todos ellos, dedico este logro con profundo respeto y gratitud.

Br. Iliana Sarahí López

DEDICATORIA

Con profunda gratitud y emoción, dedico este trabajo a todas las personas que han sido parte esencial del camino que me ha permitido llegar hasta este logro académico.

En primer lugar, agradezco a Dios por el don de la vida, por acompañarme en cada etapa de este proceso y por brindarme la fortaleza, la sabiduría y la guía necesarias para culminar este desafío.

A mis padres, **Eduar Adali González Mejía** y **Maryuri Guadalupe Rubio Soza**, por su amor incondicional, por inculcarme valores, carácter y disciplina, y por ser el mejor ejemplo de esfuerzo y perseverancia. Su apoyo constante ha sido fundamental para enfrentar cada obstáculo.

A mi hermana, **Chirly Guadalupe González Rubio**, por su acompañamiento, apoyo y motivación a lo largo de este recorrido.

A mis familiares, por su respaldo, consejos y palabras de aliento en cada etapa del proceso.

De manera especial, agradezco a mi maestro y amigo, **Ing. Oliver Josué Rivera Gutiérrez**, por su paciencia, dedicación y amabilidad, así como por compartir sus conocimientos y experiencia, los cuales fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

Br. Eduar Ali Gonzalez Rubio

DEDICATORIA

A Dios, mi Padre celestial, elevo este logro como una muestra de gratitud infinita. Su amor ha sido mi refugio y su palabra mi fuerza en cada desafío enfrentado. Nada de este camino habría sido posible sin su guía silenciosa y su presencia constante.

A mi padre, **Edgar Antonio Morales Corrales**, por ser sinónimo de fortaleza y determinación. Su ejemplo de vida me impulsa a crecer, a no conformarme y a luchar cada día por ser mejor. Su apoyo y enseñanzas han sido pilares firmes en mi formación personal y académica.

A mi madre, **Brenda Yamileth Ruiz**, mi mundo y mi mayor bendición. Su amor incondicional, su entrega y su paciencia han sido la luz que me sostuvo en los momentos más exigentes de este proceso. Este logro también le pertenece, porque en cada paso estuvo su corazón.

A mi hermana, **Alejandra Morales**, mi incondicional y ejemplo de superación. Su valentía, disciplina y espíritu de lucha y su deseo constante de superarse han sido una inspiración diaria para mí.

A nuestro tutor y asesor, **Ing. Oliver Josué Rivera Gutiérrez**, por su orientación oportuna, su compromiso académico y su constante disposición para acompañar este proceso. Su conocimiento y criterio fueron claves para el desarrollo y culminación de este trabajo.

Este trabajo monográfico representa esfuerzo, constancia y fe. A todos quienes fueron parte de este camino, directa o indirectamente, les dedico este logro con sincero agradecimiento.

Br. Edgar Antonio Morales Ruiz

RESUMEN DEL TEMA

El presente trabajo monográfico tiene como propósito evaluar el potencial de reutilización del efluente del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales (STAR) del municipio de Estelí para el riego de cultivos de tabaco, considerando los aspectos técnicos, agronómicos y comerciales que permitan establecer su viabilidad como alternativa sostenible frente al uso de fuentes subterráneas y superficiales.

Este documento consta de tres capítulos donde se abordan aspectos generales, marco teórico y los resultados obtenidos en cada uno de los análisis realizados:

Capítulo I: Aborda las generalidades del estudio, tales como la introducción, la macro y micro localización, los objetivos y la justificación de la importancia de aprovechar el efluente proveniente de la STAR, tomando en cuenta la creciente escasez hídrica y la presión sobre los acuíferos.

Capítulo II: Se presenta el marco teórico correspondiente a los fundamentos necesarios para el desarrollo de este estudio, que comprende las generalidades de las aguas residuales municipales, los métodos de estimación de caudal mediante el uso del flotador y la sección transversal, la demanda hídrica del cultivo de tabaco, y el análisis fisicoquímico y microbiológico del efluente. Asimismo, se abordan los criterios de idoneidad agronómica con base en parámetros de calidad del agua de riego, el marco legal aplicable, y la relación del reuso de aguas residuales con los principios de bioeconomía circular y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Capítulo III: Expone los resultados derivados de cuatro ejes principales:

- **Determinación del caudal:** comprende la estimación del flujo del efluente mediante métodos hidrométricos (método del flotador y la sección transversal), con el propósito de cuantificar la oferta hídrica disponible del sistema y compararla con la demanda hídrica del cultivo de tabaco en las zonas aledañas a la STAR.

- **Análisis fisicoquímico y microbiológico:** incluye la caracterización integral del efluente de la STAR a través de parámetros de calidad del agua, cuyos resultados fueron contrastados con normativas nacionales e internacionales vigentes.
- **Evaluación de la idoneidad agronómica:** aborda el análisis de los posibles riesgos de salinización, alcalinidad (RAS° y RASmod), toxicidad iónica y el aporte de nutrientes del efluente en función de las necesidades del cultivo de tabaco.
- **Estudio de viabilidad comercial:** se basa en la aplicación de encuestas a productores afiliados a la Cámara Nicaragüense de Tabacaleros, con el objetivo de determinar la disposición a pagar (DAP) por el uso del agua residual tratada y analizar su viabilidad económica frente al esquema actual de concesiones.

Finalmente, en las conclusiones se presentan de manera sintética los hallazgos relacionados con la disponibilidad, calidad e idoneidad del efluente, así como la aceptación de los productores para su uso en el riego de tabaco. Se incluyen además recomendaciones orientadas a promover la implementación segura del reuso de aguas residuales en la agricultura. Los anexos complementan el estudio con instrumentos aplicados, tablas normativas, esquemas de localización y los resultados detallados de los muestreos de campo y laboratorio, asegurando la validez técnica y científica de la investigación.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO I GENERALIDADES

| | | |
|--------|-----------------------------|---|
| 1.1. | Introducción..... | 1 |
| 1.1.1. | Macro localización | 3 |
| 1.1.2. | Micro localización..... | 4 |
| 1.2. | Antecedentes | 6 |
| 1.3. | Justificación..... | 8 |
| 1.4. | Objetivos | 9 |
| 1.4.1. | Objetivo general..... | 9 |
| 1.4.2. | Objetivos específicos | 9 |

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

| | | |
|--------|---|----|
| 2.1. | Generalidades de las aguas residuales municipales..... | 10 |
| 2.2. | Estimación del caudal de agua..... | 10 |
| 2.2.1. | Método del flotador y la sección transversal | 10 |
| 2.2.2. | Variabilidad del caudal en aguas residuales | 10 |
| 2.2.3. | Demanda hídrica del cultivo de tabaco para evaluar la suficiencia del caudal disponible | 11 |
| 2.3. | Análisis fisicoquímicos en aguas residuales..... | 11 |
| 2.3.1. | Tratamiento de aguas residuales municipales | 12 |
| 2.3.2. | Tratamiento preliminar | 12 |
| 2.3.3. | Tratamiento primario | 12 |
| 2.3.4. | Tratamiento secundario | 13 |
| 2.3.5. | Reuso de agua residual depurada | 13 |
| 2.3.6. | Reuso de agua residual depurada en la agricultura..... | 13 |
| 2.3.7. | Marco legal aplicado al reuso de agua residual | 14 |
| 2.4. | Idoneidad agronómica por calidad de agua de riego | 14 |
| 2.4.1. | Degradación de suelos por riego con aguas residuales..... | 15 |

| | |
|--|----|
| 2.4.2. Indicadores de salinidad en el suelo por calidad de agua de riego | 15 |
| 2.4.3. Indicadores de alcalinidad en el suelo por calidad de agua de riego . | 15 |
| 2.4.4. Amenaza de toxicidad por reuso de las aguas residuales municipales en riego agrícola | 15 |
| 2.4.5. Riesgo microbiológico en aguas residuales | 16 |
| 2.4.6. Verificación y calidad microbiológica del reuso de aguas residuales . | 16 |
| 2.4.7. Requerimientos agroclimáticos y nutricionales del tabaco | 19 |
| 2.5. Viabilidad comercial del reuso de aguas residuales | 19 |
| 2.5.1. Potencial de comercialización del agua residual depurada..... | 20 |
| 2.5.2. Beneficios del agua residual depurada | 20 |
| 2.5.3. Valoración contingente..... | 20 |
| 2.5.4. Bioeconomía circular y el tratamiento de aguas residuales | 21 |
| 2.5.5. Paradigma de valorización de aguas residuales para mejorar la armonía con los objetivos de desarrollo sostenible..... | 23 |

CAPÍTULO III ANÁLISIS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

| | |
|--|----|
| 3.1. Aforo de caudal | 27 |
| 3.1.1. Metodología | 27 |
| 3.1.2. Variaciones de caudal..... | 29 |
| 3.1.2.1. Puntos de aforo | 29 |
| 3.1.2.2. Levantamiento de secciones transversales en los puntos de aforo | 30 |
| 3.1.2.3. Registro de medición de caudales..... | 33 |
| 3.1.3. Comparación con la demanda hídrica del cultivo..... | 36 |
| 3.1.4. Conclusión del objetivo 1 | 38 |
| 3.2. Análisis físico-químicos y microbiológico del efluente | 40 |
| 3.2.1. Metodología | 40 |

| | |
|--|----|
| 3.2.2. Muestreos compuestos | 44 |
| 3.2.2.1. Recolección y toma de muestras de parámetros físico-químicos | 44 |
| 3.2.2.2. Resultados de los análisis Físico-Químicos y microbiológicos del efluente | 48 |
| 3.2.2.3. Cumplimiento de los parámetros evaluados respecto a normas nacionales e internacionales | 52 |
| 3.2.2.4. Interpretación técnica de los parámetros frente a las normativas aplicables..... | 54 |
| 3.2.3. Conclusión del objetivo 2 | 56 |
| 3.3. Evaluación de la idoneidad agronómica | 57 |
| 3.3.1. Metodología | 57 |
| 3.3.2. Consideraciones agronómicas del reuso del efluente..... | 59 |
| 3.3.2.1. Peligro de salinización | 59 |
| 3.3.2.2. Peligro de alcalinidad..... | 61 |
| 3.3.2.3. Peligro de toxicidad | 67 |
| 3.3.2.4. Riesgo microbiológico..... | 68 |
| 3.3.2.5. Contribución de nutrientes | 69 |
| 3.3.3. Conclusión del objetivo 3 | 71 |
| 3.4. Estimación de la viabilidad comercial del reuso del efluente en la agricultura | 72 |
| 3.4.1. Metodología | 72 |
| 3.4.2. Resultados de las encuestas | 74 |
| 3.4.2.1. Conocimiento en los beneficios del reuso..... | 76 |
| 3.4.2.2. Localización de predios | 76 |
| 3.4.2.3. Área total de los predios | 78 |
| 3.4.2.4. Interés en el reuso | 79 |

| | |
|--|-----------|
| 3.4.2.5. Razones para la adquisición de agua residual depurada | 80 |
| 3.4.2.6. Comparación de la preferencia de los productores entre el uso de agua residual depurada y su fuente actual de riego | 81 |
| 3.4.2.7. Interés en prueba piloto | 82 |
| 3.4.2.8. DAP de los encuestados..... | 83 |
| 3.4.3. Evaluación económica de la disposición a pagar (DAP) por el reuso del efluente84 | |
| 3.4.4. Conclusión del objetivo 4 | 87 |
| CONCLUSIONES..... | 89 |
| RECOMENDACIONES | 91 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 92 |
| ANEXOS | I |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Toxicidad en el riego | 16 |
| Tabla 2. Monitoreos de verificación mínima recomendada de los objetivos de desempeño microbiano para el uso de aguas residuales y excretas en la agricultura..... | 18 |
| Tabla 3. Resumen de resultados de aforo del efluente de la STAR del municipio de Estelí | 33 |
| Tabla 4. Comparación diaria entre el caudal del efluente y la demanda hídrica del cultivo de tabaco..... | 37 |
| Tabla 5. Parámetros físico-químicos y bacteriológicos a evaluar para determinar la calidad del efluente | 42 |
| Tabla 6. Valores máximos permisibles según normativas | 43 |
| Tabla 7. Registro de aforo y volumen recolectado del efluente-primera jornada de muestreo | 45 |
| Tabla 8. Registro de aforo y volumen recolectado del efluente-segunda jornada de muestreo..... | 46 |
| Tabla 9. Registro de aforo y volumen recolectado del efluente-tercera jornada de muestreo | 47 |
| Tabla 10. Resultados experimentales de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos para determinar la calidad del efluente | 50 |
| Tabla 11. Clasificación de la salinidad del efluente según criterios agronómicos FAO | 60 |
| Tabla 12. Resultados de los valores de calcio corregido para agua de riego | 62 |
| Tabla 13. Valores de Na^+ , Mg^{2+} , Ca° y RAS° para cada muestreo | 63 |
| Tabla 14. Resultados obtenidos de la RAS° vs CEw | 64 |
| Tabla 15. Resultados de la RAS_{mod} para determinar el peligro de sodicidad en el agua de riego..... | 65 |
| Tabla 16. Tabla de costos de concesión para aprovechamiento de agua | 73 |
| Tabla 17. Caracterización de los actores involucrados en la estimación de la viabilidad comercial del reuso del efluente tratado | 74 |
| Tabla 18. Resumen consolidado de respuestas | 75 |

| | |
|--|-------|
| Tabla 19. Propietarios agrícolas por municipio | 77 |
| Tabla 20. Valor promedio de DAP | 86 |
| Tabla 21. Parámetros físico-químicos establecidos por la NTON 05 027 05 para reuso de aguas residuales municipales..... | VI |
| Tabla 22. Parámetros para evaluación de idoneidad agronómica por calidad de agua de riego..... | VII |
| Tabla 23. Ficha de campo para registro de medición de caudales | VIII |
| Tabla 24. Aforo de caudal día lunes (aguas arriba) | VIII |
| Tabla 25. Aforo de caudal día lunes (aguas abajo)..... | IX |
| Tabla 26. Aforo de caudal día martes (aguas arriba) | IX |
| Tabla 27. Aforo de caudal día martes (aguas abajo) | X |
| Tabla 28. Aforo de caudal día miércoles (aguas arriba)..... | X |
| Tabla 29. Aforo de caudal día miércoles (aguas abajo) | XI |
| Tabla 30. Aforo de caudal día jueves (aguas arriba)..... | XI |
| Tabla 31. Aforo de caudal día jueves (aguas abajo) | XII |
| Tabla 32. Aforo de caudal día viernes (aguas arriba) | XII |
| Tabla 33. Aforo de caudal día viernes (aguas abajo)..... | XIII |
| Tabla 34. Aforo de caudal día sábado (aguas arriba) | XIII |
| Tabla 35. Aforo de caudal día sábado (aguas abajo)..... | XIV |
| Tabla 36. Aforo de caudal día domingo (aguas arriba) | XIV |
| Tabla 37. Aforo de caudal día domingo (aguas abajo)..... | XV |
| Tabla 38. Aforo de caudal día lunes (aguas arriba) | XV |
| Tabla 39. Aforo de caudal día lunes (aguas abajo)..... | XVI |
| Tabla 40. Formato de análisis comparativo entre el caudal disponible del efluente y las necesidades hídricas del tabaco | XVI |
| Tabla 41. Formato de verificación del cumplimiento de parámetros fisicoquímicos en muestras del efluente de la STAR de Estelí para reuso agrícola | XVII |
| Tabla 42. Ficha de campo para recolección y toma de muestras de parámetros físico-químicos..... | XVIII |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|-------|
| Figura 1. Macro localización de la descarga del efluente de la STAR de Estelí .. | 3 |
| Figura 2. Microlocalización (Quebrada "La Limonosa") | 4 |
| Figura 3. Microlocalización (STAR de Estelí) | 4 |
| Figura 4. Microlocalización (Punto de descarga de la STAR Estelí)..... | 5 |
| Figura 5. Formatos de preguntas bajo MVC | 21 |
| Figura 6. Relación del ODS 6 con otros | 24 |
| Figura 7. Ubicación de los puntos de aforo | 29 |
| Figura 8. Esquema secciones transversales en los tramos de aforo | 30 |
| Figura 9. Perfil de sección transversal representativa aguas abajo..... | 32 |
| Figura 10. Perfil de sección transversal representativa aguas arriba | 32 |
| Figura 11. Mediciones de caudal del efluente..... | 34 |
| Figura 12. Caudales promedios máximos, medios y mínimos..... | 35 |
| Figura 13. Apariencia del efluente con presencia de compuestos detergentes. | 49 |
| Figura 14. Regresión de la RAS° vs RAS_{mod} | 66 |
| Figura 15. Conocimiento del reuso | 76 |
| Figura 16. Área total de los predios | 78 |
| Figura 17. Interés en el reuso agrícola | 79 |
| Figura 18. Razones para la adquisición de agua residual depurada | 80 |
| Figura 19. Comparación de la preferencia de los productores entre el uso de agua residual depurada y su fuente actual de riego | 81 |
| Figura 22. Interés de los encuestados en participar en una prueba piloto..... | 82 |
| Figura 20. DAP de los participantes | 83 |
| Figura 21. Comparación entre DAP y concesión ANA..... | 85 |
| Figura 23. Macrolocalización | III |
| Figura 24. Microlocalización (Quebrada "La Limonosa") | III |
| Figura 25. Microlocalización (STAR de Estelí)..... | IV |
| Figura 26. Microlocalización (Punto de descarga de la STAR Estelí)..... | IV |
| Figura 27. Localización de los diferentes Sistemas de Tratamientos de Aguas Residuales municipales de Nicaragua..... | V |
| Figura 28. Perfil de sección transversal 1 del cuerpo receptor (aguas arriba)..... | XVIII |

| | |
|--|--------|
| Figura 29. Perfil de sección transversal 2 del cuerpo receptor (aguas arriba) . | XIX |
| Figura 30. Perfil de sección transversal 3 del cuerpo receptor (aguas arriba) . | XIX |
| Figura 31. Perfil de sección transversal 1 del cuerpo receptor (aguas abajo) .. | XX |
| Figura 32. Perfil de sección transversal 2 del cuerpo receptor (aguas abajo) . | XXI |
| Figura 33. Perfil de sección transversal 3 del cuerpo receptor (aguas abajo) .. | XXI |
| Figura 34. Implementación del ODS 6 en el progreso mundial | XXII |
| Figura 35. Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales (STAR) del municipio de Estelí. | XXIII |
| Figura 36. Concentración de Ca° en función de la CE y de la relación HCO_3/Ca | XXIV |
| Figura 37. Reducción de la infiltración en función de RAS° y de la CE del agua de riego | XXV |
| Figura 38. Descarga del efluente de la STAR de Estelí..... | XXV |
| Figura 39. Estado actual del cuerpo receptor del efluente de la STAR de Estelí | XXVI |
| Figura 40. Quebrada “La Limonosa” Estelí..... | XXVI |
| Figura 41. Levantamiento de sección transversal en el tramo aguas arriba . | XXVII |
| Figura 42. Levantamiento de sección transversal en el tramo aguas abajo . | XXVII |
| Figura 43. Menciones de profundidades de flujo | XXVIII |
| Figura 44. Objeto flotante medidor de velocidad de flujo según FAO, (2006) | XXVIII |
| Figura 45. Recolección de submuestras del efluente en el punto de muestreo | XXIX |
| Figura 46. Integración de submuestras para conformar la muestra compuesta | XXIX |
| Figura 47. Envasado y refrigeración del efluente para transporte al laboratorio | XXX |
| Figura 48. Aforo para determinar el volumen proporcional de submuestras .. | XXX |
| Figura 49. Registro de temperatura in situ..... | XXXI |
| Figura 50. Primer informe de ensayos de agua residual depurada proveniente de la STAR del municipio de Estelí | XXXII |

Figura 51. Segundo informe de ensayos de agua residual depurada proveniente de la STAR del municipio de EstelíXXXIII

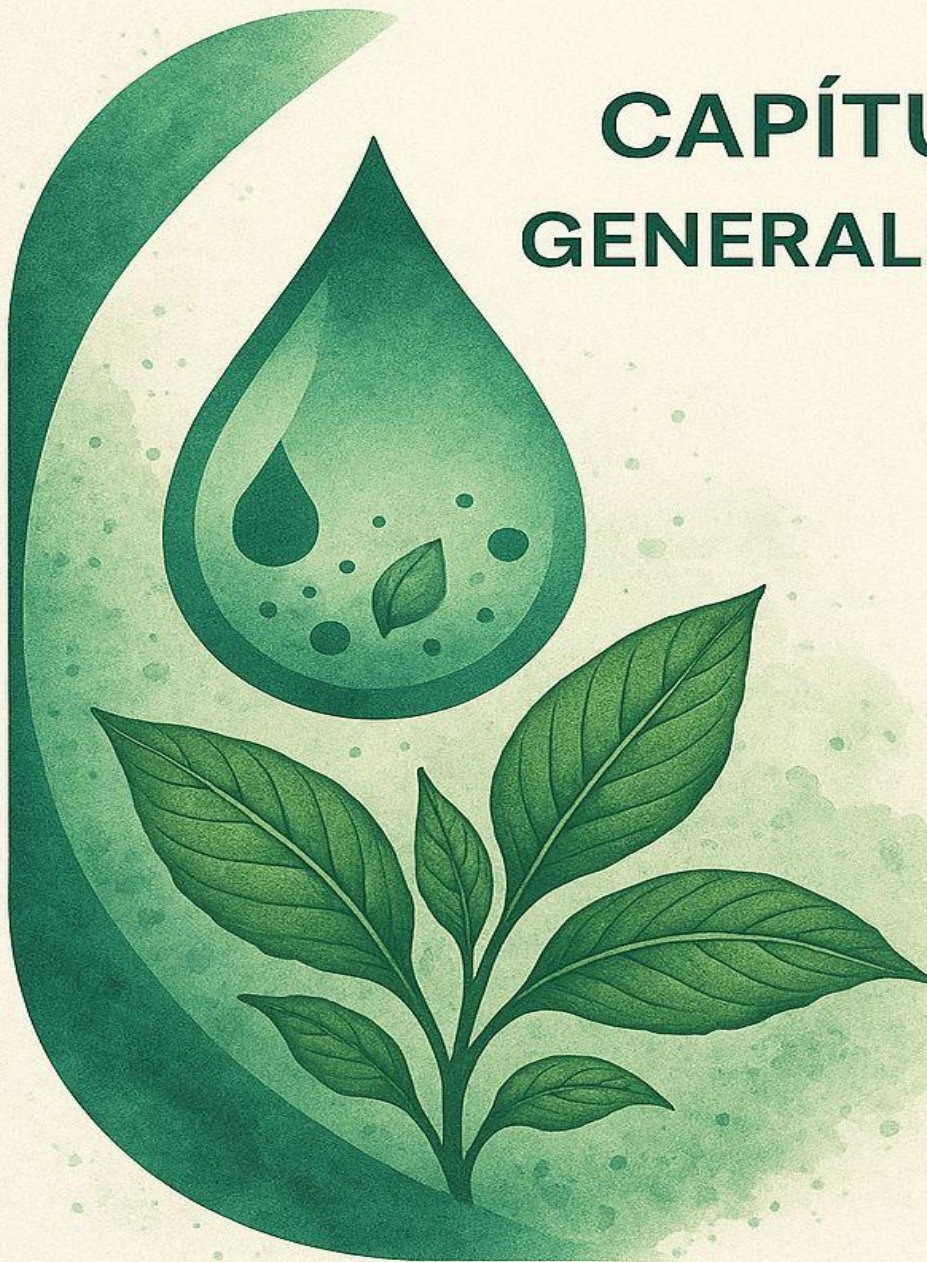
Figura 52. Tercer informe de ensayos de agua residual depurada proveniente de la STAR del municipio de EstelíXXXIV

ÍNDICE DE ECUACIONES

| | |
|---|----|
| Ecuación 1. Determinación de caudal del efluente por método del flotador | 28 |
| Ecuación 2. Cálculo de velocidad superficial del flujo | 28 |
| Ecuación 3. Cálculo del área de la sección transversal (A)..... | 28 |
| Ecuación 4. Toma de muestras en el efluente | 40 |
| Ecuación 5. Cálculo del caudal a la hora de la muestra simple..... | 41 |
| Ecuación 6. Cálculo del caudal promedio (L/s) | 41 |
| Ecuación 7. Determinación de la relación de absorción del sodio (RAS°) | 58 |
| Ecuación 8. Determinación de la relación de absorción del sodio modificada (RAS _{mod}) | 58 |

CAPÍTULO I

GENERALIDADES



1.1. Introducción

En Nicaragua, la prolongación de los períodos secos ha generado un incremento significativo en la reducción de los niveles de agua, tanto superficial como subterránea. Este fenómeno afecta profundamente la recarga de los acuíferos, que dependen de las precipitaciones para su renovación (Espinosa et al., 2016). Se prevé que esta tendencia continuará e incluso se intensificará en los próximos años. Es por esto que la necesidad de diseñar estrategias eficaces de gestión del riesgo de sequía se ha convertido en una prioridad para el país.

Actualmente, más del 80% del agua extraída cada año de fuentes subterráneas se destina a la agricultura, pero su uso excesivo plantea serios riesgos medioambientales debido a la sobreexplotación de los acuíferos (Espinosa et al., 2016). En este contexto, el agua residual depurada se presenta como una fuente muy valiosa para el riego de las cosechas.

Sin embargo, la reutilización del agua residual doméstica en la región es escasa. Según el Sistema de la Interacción Centroamericana (SICA, 2013), en todo el país solo se riegan 352 manzanas anuales con este recurso. Esto se debe a la falta de protocolos estandarizados en los Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales (STAR) y a la carencia de criterios claros para su evaluación y caracterización. Además, la ausencia de datos concluyentes sobre los riesgos asociados a componentes minoritarios dificulta su aprovechamiento, llevando a su descarga directa en cuerpos de agua superficiales.

Con base en lo antes mencionado, el objetivo principal de la investigación es determinar el potencial de reutilización del efluente la STAR del municipio de Estelí con la finalidad de reutilizarlo para el riego de cultivos de tabaco, lo que representaría una alternativa viable para el destino provechoso del efluente, evitando con ello la contaminación de las fuentes de agua locales.

En este sentido, la STAR del municipio de Estelí trabaja por medio de lagunas anaerobias y de estabilización del tipo facultativa, las cuales operan gracias a la presencia de bacterias que se encargan de realizar el proceso de degradación de la materia orgánica. El efluente generado por la STAR es vertido a la quebrada

“La Limonosa”, afluente del río Estelí, ubicada en las coordenadas geográficas latitud: 13°06'36" y longitud: 86°21'35" (Ver Anexos, Figura 24, pág. III).

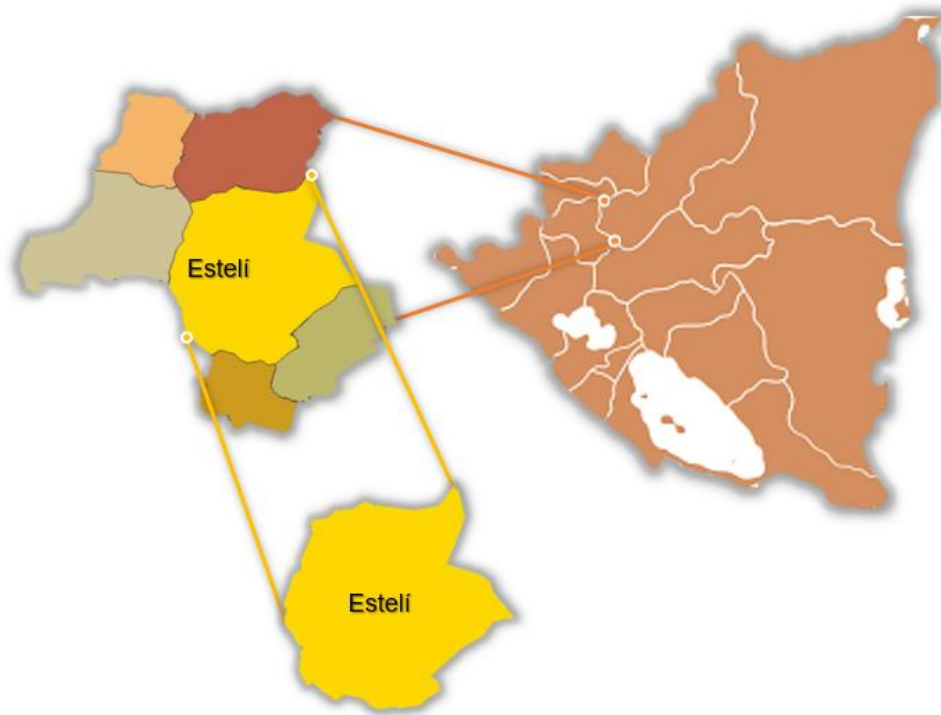
Por lo tanto, se evaluó el potencial de reutilización del efluente de la STAR de Estelí mediante la realización de aforos utilizando el método del flotador y la medición de la sección transversal para determinar su disponibilidad real para riego, junto con análisis de laboratorio que verificaron su calidad de reuso conforme a los límites máximos permisibles de reuso en la categoría 3, tipo "C", según la Norma Técnica Obligatoria Nicaragüense para regular los sistemas de tratamientos de aguas residuales y su reuso (NTON 05 027 05, 2006).

Además, se analizó su idoneidad agronómica con base en los estándares establecidos por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación por sus siglas en inglés (FAO, 1985) y la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2006). Finalmente, su viabilidad comercial se estimó mediante el método de valoración contingente, determinando la disposición a pagar de los agricultores y comparándola con los costos actuales de concesión de agua.

1.1.1. Macro localización

La STAR de donde proviene el efluente en estudio, pertenece al municipio de Estelí, departamento de Estelí (Ver figura 1).

Figura 1. Macro localización de la descarga del efluente de la STAR de Estelí



Fuente: Adaptado de Google Maps, (2025)

1.1.2. Micro localización

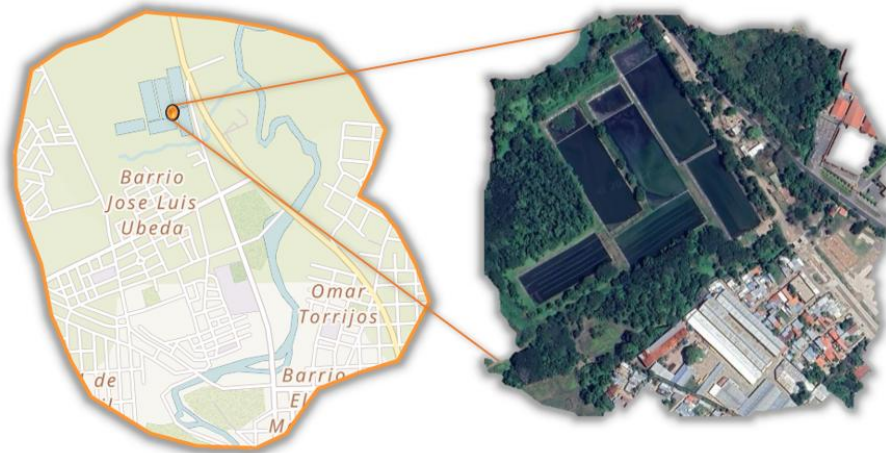
El efluente generado por la STAR es vertido a la quebrada "La Limonosa", afluente del rio Estelí, ubicada en las coordenadas geográficas las coordenadas geográficas 13°06'36"N, 86°21'35"O.

Figura 2. Microlocalización (Quebrada "La Limonosa")



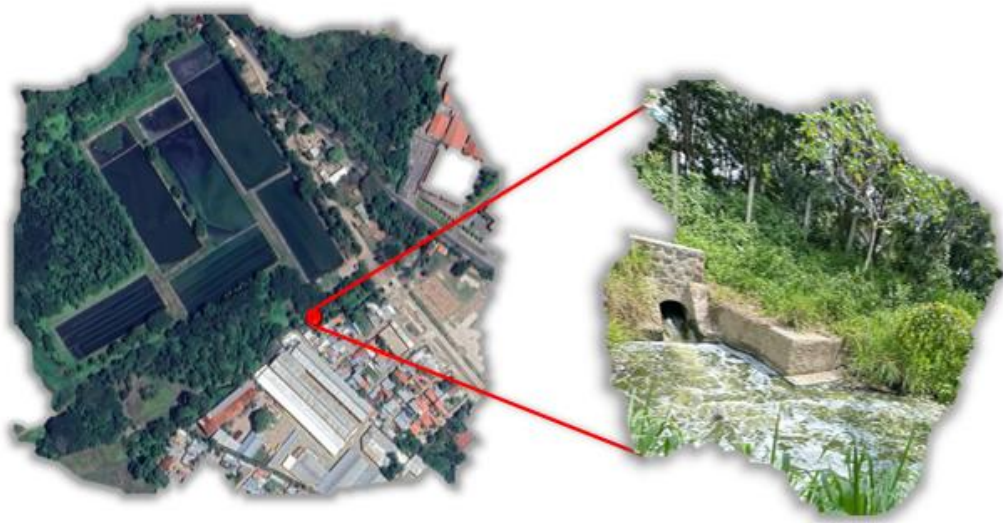
Fuente: Adaptado de Google Earth, (2025)

Figura 3. Microlocalización (STAR de Estelí)



Fuente: Adaptado de Google Earth, (2025)

Figura 4. Microlocalización (Punto de descarga de la STAR Estelí)



Fuente: Adaptado de Google Earth, (2025)

1.2. Antecedentes

El Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales (STAR) del municipio de Estelí se encuentra ubicado en la salida norte de la ciudad, en las coordenadas geográficas 13°6'37.67"N, 86°21'43.94"O (Ver Anexos, Figura 25, pág. IV). Fue construido con un sistema de pretratamiento compuesto por dos rejillas gruesas, una rejilla fina, un desarenador, y un tornillo directo, tratamiento primario mediante lagunas anaerobias y tratamiento secundario a través de lagunas facultativas distribuidas en tres módulos (A, B y C) (Ver Anexos, Figura 35, pág. XXIII).

Según la Empresa Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados Sanitarios (ENACAL, 2015), el diseño del Módulo A fue presentado en 1985 y construido en 1986 con financiamiento del gobierno de Nicaragua. El Módulo B fue financiado por fuentes alemanas a través de "Casas hermanas", mientras que el Módulo C se construyó en 1994 con apoyo de la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID). Todos los módulos siguieron las especificaciones de diseño del Módulo A, con un caudal de diseño de 100 L/s.

En 1995, se realizó la primera rehabilitación para el Módulo A y entre 1999 y 2000 para los Módulos B y C después del Huracán Mitch en octubre de 1998. Estos cambios se debieron a la ineficiencia en cumplir con los niveles permisibles para el efluente en parámetros como la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), la demanda química de oxígeno (DQO) y coliformes fecales establecidos en el Decreto Ejecutivo N° 33-95: "Disposiciones para el control de la contaminación proveniente de las descargas de las aguas residuales domésticas, industriales y agropecuarias", (ahora Decreto Ejecutivo N° 21-2017), debido a un aumento del 50% en la población con acceso al sistema de alcantarillado.

En 2002, por medio de evaluaciones se encontraron incumplimientos con los parámetros del Decreto Ejecutivo N° 33-95, lo que llevó a mejoras en el Módulo A, luego en los meses de julio a octubre de 2003 y en los Módulos B y C de diciembre de 2003 a octubre de 2004, ampliando la capacidad de 100 a 300 L/s, proyectada para 2024. Las modificaciones consistieron en la combinación

existente de lagunas facultativas primarias (LP) + lagunas aerobias secundarias (LA)+ laguna facultativa (LF) + laguna de maduración (LM).

También se amplió la capacidad para tratar aguas residuales de la red de alcantarillado sanitario (RAS) para que el efluente del STAR cumpliera con los requisitos de la normativa de vertido vigente en ese momento.

Sin embargo, a pesar de las mejoras implementadas, aún no se han identificado usos sostenibles y eficientes para las aguas residuales depuradas que salen de la STAR, lo que ha limitado la maximización de sus beneficios tanto ambientales como económicos en la región. La presente investigación es la primera en el país enfocada en el aprovechamiento hídrico de los efluentes de las STAR.

En investigaciones realizadas a nivel internacional, se encontró a Gómez (2012), quien, en su investigación desarrollada en la región de El Ejido, Almería, España, buscó determinar la aptitud de los cultivos de tabaco bajo invernadero siendo regados con agua residual urbana depurada. En este estudio se empleó un efluente obtenido de procesos secundarios por medio de lodos activados. Gómez evaluó diversos parámetros en el agua de riego, las plantas y el suelo, aplicando cromatografía líquida y gaseosa para detectar contaminantes y metales pesados. Los hallazgos concluyeron que el agua tratada es adecuada para el riego, ya que no afectó negativamente la producción de biomasa ni la calidad de compuestos industriales como proteínas y nicotina en las plantas de tabaco.

Polanía & Tolorza (2020), evaluaron el potencial de reuso de aguas residuales tratadas en El Cerrito, Valle del Cauca, Colombia para riego en cultivos de caña de azúcar. El efluente era proveniente de procesos secundarios que incluían lagunas facultativas con baffles, fue analizada fisicoquímicamente y biológicamente. Se encontró que la calidad del agua cumplía con los estándares agronómicos, aunque tenía una alta presencia de huevos de helminto. A pesar de este problema, se concluyó que el agua residual depurada es viable comercialmente para el riego de cultivos agrícolas. Sin embargo, se destacó la necesidad de mejorar los tratamientos para eliminar los helmintos y así garantizar la seguridad y aceptación por parte de los agricultores.

1.3. Justificación

El uso sostenible del agua y la reutilización de las aguas residuales son urgentes hoy en día, teniendo en cuenta su creciente escasez y el aumento del consumo debido a las actividades humanas (Al-Hazmi et al., 2023). El objetivo de desarrollo sostenible 6, definido por la Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2015) cuya finalidad es “garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos”, destacó la necesidad de reciclar las aguas residuales para garantizar la disponibilidad de agua para las personas.

En concordancia con este objetivo, en 2021 se establece el Lineamiento 2 del Plan Nacional de Lucha contra la Pobreza y para el Desarrollo Humano 2022-2026 (PNLC-DH), "Reforzar las condiciones básicas para el desarrollo", reafirmando la importancia de incrementar la disponibilidad de agua potable y saneamiento en Nicaragua. Ambos enfoques resaltan la necesidad de adoptar prácticas sostenibles en el manejo del agua, especialmente en la agricultura, sector que representa la mayor demanda de agua dulce a nivel global.

La investigación desarrollada se centró en evaluar el potencial de reuso del efluente del STAR de Estelí para el fertirriego de cultivos de tabaco, considerando el aprovechamiento de los nutrientes y la percepción de los potenciales usuarios del agua residual para la irrigación. Esta alternativa podría implementarse en los 41 sistemas de tratamiento de aguas residuales que operan en Nicaragua (Ver Anexos, Figura 27, pág. V) según reporta ENACAL (2019), evaluando el reuso del efluente según las necesidades específicas de cada cultivo y las particularidades de cada región. De esta manera, los efluentes de las STAR podrían convertirse en un recurso agrícola útil, reduciendo la presión sobre las fuentes de agua y asegurando un suministro constante para el riego.

Por otra parte, esta investigación no solo aporta al uso eficiente de recursos y al cuidado ambiental, sino que también impulsa un cambio cultural en zonas urbanas y rurales, promoviendo una bioeconomía circular que transforme los desechos en oportunidades de valor y desarrollo económico para el país.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Realizar una propuesta de reuso del efluente del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales (STAR) del municipio de Estelí para el riego de cultivos de tabaco.

1.4.2. Objetivos específicos

- ✓ Calcular las variaciones de caudal generados por el efluente de la STAR de Estelí, utilizando el método del flotador y la sección transversal, para la identificación de su disponibilidad real para riego.
- ✓ Analizar las concentraciones fisicoquímicas de los muestreos compuestos del efluente para la verificación del cumplimiento con los límites máximos permisibles de vertido de acuerdo a la NTON 05-027-05.
- ✓ Evaluar la idoneidad agronómica del efluente proveniente de la STAR del municipio de Estelí, para su aplicación en el riego de cultivos de tabaco.
- ✓ Estimar la viabilidad comercial del potencial del reuso de aguas residuales domésticas en los cultivos de tabaco, considerando aspectos económicos y de mercado.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO



A continuación, se presenta el marco teórico de la investigación de tal manera que solo se definirán conceptos, variables y consideraciones que se refieren al reuso del agua residual en el sector agrícola. Así como, las unidades de depuración con las que se cuenta en las instalaciones del sistema de tratamiento de aguas residuales de Estelí.

2.1. Generalidades de las aguas residuales municipales

Las aguas residuales municipales son el resultado de la combinación de diferentes flujos de agua que se descargan en los sistemas de drenaje urbanos después de ser utilizadas. Estas aguas contienen una amplia gama de sustancias contaminantes provenientes de hogares, instituciones, comercios e industrias. A menudo, estas aguas residuales se combinan con aguas subterráneas infiltradas en la red de drenaje, o con aguas superficiales o de lluvia en el caso de sistemas de drenaje combinados (Noyola et al., 2013).

2.2. Estimación del caudal de agua

En referencia a la FAO (2006), estimar caudales de agua es el proceso de determinar el volumen de agua que circula por un arroyo o canal en un tiempo específico. Su precisión varía según el método utilizado, como el empleo de flotadores, la medición de la sección transversal o el uso de trazadores.

2.2.1. Método del flotador y la sección transversal

El método del flotador es una técnica utilizada para la estimación del caudal en cuerpos de agua, basada en la medición del tiempo que un objeto flotante tarda en recorrer una distancia establecida. Para su aplicación, se determina la sección transversal del cauce, calculando su área a partir de la profundidad y la anchura media del flujo. La combinación de ambos elementos permite obtener una aproximación del caudal de manera sencilla y práctica, siendo una alternativa útil en estudios de recursos hídricos (FAO, 2006).

2.2.2. Variabilidad del caudal en aguas residuales

Tal como indica Díaz (2014), las variaciones de caudal en aguas residuales provenientes de los sistemas de tratamiento se refieren a los cambios en el volumen de agua descargada a lo largo del tiempo. Los caudales varían según los

patrones de consumo, siendo mínimos en la madrugada por infiltraciones y escapes, y máximos al final de la mañana y la tarde debido a la actividad residencial, comercial e industrial. Estas fluctuaciones también dependen del clima y la capacidad operativa del sistema.

2.2.3. Demanda hídrica del cultivo de tabaco para evaluar la suficiencia del caudal disponible

La demanda de agua en el sector agrícola se centra en comprender las necesidades hídricas de los cultivos. En tal sentido, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2015), afirma que, para ello, se examina cómo interactúan con las condiciones climáticas y del suelo en todo el país. Se estima el agua requerida por los cultivos mediante el cálculo de la evapotranspiración y el balance hídrico del suelo.

El cultivo de tabaco requiere un suministro adecuado de agua, con mayor demanda en las primeras etapas de crecimiento. Sus necesidades hídricas oscilan entre 500 y 1500 mm anuales, siendo óptimos 1250 mm. Durante el periodo vegetativo, requiere entre 400 y 600 mm, mientras que en cultivos de temporal necesita de 1000 a 1200 mm (Ruíz et al., 2013). Para evitar afectaciones en la calidad del tabaco, se recomienda el riego y un periodo seco en la maduración y cosecha.

2.3. Análisis fisicoquímicos en aguas residuales

Se define como el conjunto de métodos que permiten evaluar parámetros clave de la calidad del agua, necesarios para definir su tratamiento (Giraldo, 1995). Entre ellos destacan el pH, que mide la acidez o alcalinidad, y la temperatura, que afecta la solubilidad del oxígeno y la velocidad de las reacciones químicas (Metcalf & Eddy, 2014).

Para fines de la investigación, los valores límites permitidos para estos parámetros están establecidos en la norma NTON 05 027 05, específicamente en la categoría 3, tipo C, correspondiente al uso de aguas residuales con fines agrícolas (Ver Anexos, Tabla 21, pág. VI).

2.3.1. Tratamiento de aguas residuales municipales

El tratamiento de aguas residuales es una estrategia clave para enfrentar la sobreexplotación de fuentes hídricas y el creciente estrés hídrico a nivel global. Mediante procesos de depuración, permite la eliminación de contaminantes y la recuperación del recurso, facilitando su reutilización en diversas aplicaciones (Morgan et al., 2023).

Para fines de la investigación únicamente se definirán las unidades de tratamiento con las que se cuenta en el Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales (STAR) del municipio de Estelí, así como, los niveles de depuración que se logran en el mismo.

2.3.2. Tratamiento preliminar

El tratamiento preliminar o pretratamiento es fundamental para preparar las aguas residuales para el tratamiento posterior sin dañar los equipos mecánicos ni obstruir las tuberías con depósitos permanentes en los tanques. Además, ayuda a mitigar problemas como las fluctuaciones de caudal y la presencia de materiales flotantes como aceites y grasas (NTON 05 027-05, 2006).

En la STAR de Estelí, los procesos utilizados en el tratamiento preliminar incluyen la remoción de sólidos gruesos por medio de un canal de rejillas, la remoción de arenas mediante desarenadores, y la remoción partículas sólidas finas utilizando tamiz mecánico, además cuenta con una canaleta parshall para la medición de caudal.

2.3.3. Tratamiento primario

El tratamiento primario implica el uso de un proceso físico-químico que involucra la sedimentación de sólidos suspendidos, u otros métodos que reduzcan al menos un 20% la DBO₅ de las aguas residuales antes de ser vertidas, y al menos un 50% de los sólidos en suspensión presentes en las aguas residuales de entrada (NTON 05 027-05, 2006).

Las unidades utilizadas en la STAR de Estelí para la remoción de materia orgánica a través de un proceso biológico que realizan las bacterias en el tratamiento primario es por medio lagunas anaerobias.

2.3.4. Tratamiento secundario

El tratamiento secundario se centra en eliminar la materia orgánica biodegradable de las aguas residuales que no ha sido eliminada durante el tratamiento primario. Implica inducir el crecimiento de microorganismos capaces de descomponer la materia orgánica mediante procesos biológicos como la sedimentación secundaria, o cualquier otro método que cumpla con los requisitos establecidos por regulaciones (NTON 05 027-05, 2006).

A continuación, del tratamiento primario de la STAR de Estelí se encuentran las lagunas facultativas y de maduración cuya función en el tratamiento secundario es la remoción de materia orgánica y agentes patógenos del agua.

2.3.5. Reuso de agua residual depurada

Seguí (2004), introduce que el concepto de reuso de aguas depuradas se refiere a la aplicación beneficiosa del agua residual o regenerada en diversos usos, como industrial, agrícola, recreativo, municipal, entre otros. Este proceso implica someter el agua residual a un tratamiento para que cumpla con los criterios necesarios para su reutilización. La práctica de reutilización de aguas residuales tiene una historia que se remonta a la antigua Grecia y ha evolucionado a lo largo de tres etapas fundamentales en el desarrollo de la regeneración y reutilización de aguas residuales.

2.3.6. Reuso de agua residual depurada en la agricultura

Morgan et al., (2023), expresan que el reuso de aguas residuales en la agricultura surge como una solución clave para abordar la escasez de agua y promover la sostenibilidad agrícola. Con más del 60% del agua dulce utilizada para el riego, el reuso ofrece ventajas como un suministro confiable y costos de tratamiento más bajos.

Sin embargo, enfrenta desafíos en la eliminación de contaminantes y patógenos, requiriendo procesos adecuados para garantizar su seguridad microbiológica y fisicoquímica. La acumulación de metales pesados y la salinidad pueden afectar la productividad del suelo, por lo que es esencial seguir normas internacionales para su correcto tratamiento antes del reuso agrícola (Morgan et al., 2023).

2.3.7. Marco legal aplicado al reuso de agua residual

En Nicaragua, el reuso de aguas residuales en la agricultura y otros sectores está regulado por un conjunto de leyes y normativas técnicas que buscan garantizar la protección de la salud pública y el medio ambiente. Este marco legal comprende disposiciones que van desde el tratamiento de las aguas residuales hasta su aplicación segura en campos agrícolas. A continuación, se presentan los principales instrumentos legales que rigen estas prácticas en el país.

Decreto ejecutivo N°, 21-2017, “Reglamento en el que se establece n las disposiciones para el vertido de aguas residuales”:

"Este reglamento establece las disposiciones para el vertido de aguas residuales de actividades domésticas, industriales, comerciales, agroindustriales y de servicio a cuerpos receptores y alcantarillado sanitario, definiendo límites máximos permisibles y regulaciones para su tratamiento, en conformidad con la Ley No. 217, Ley general del medio ambiente y los recursos naturales y su reglamento" (Decreto Ejecutivo N° 21-2017, 2017).

Norma técnica NTON 05-027-05, “Norma técnica obligatoria nicaragüense para regular los sistemas de tratamientos de aguas residuales y su reuso”:

"Esta norma regula los sistemas de tratamiento de aguas residuales y su reuso, estableciendo requisitos mínimos para garantizar un reuso seguro en la agricultura y la protección de la salud humana y el ambiente" (NTON 05 027-05, 2006).

2.4. Idoneidad agronómica por calidad de agua de riego

La evaluación agronómica del agua de riego se enfoca en analizar su salinidad, la disponibilidad de nutrientes en el suelo y los nutrientes que el agua aporta. Este análisis es esencial para garantizar un riego eficiente y un buen desarrollo de los

cultivos (INNOTEC Laboratorios, 2021). Los parámetros utilizados comúnmente para la evaluación de la idoneidad agronómica se detallan en la tabla 7 (Ver Anexos, Tabla 7, pág. VII).

2.4.1. Degradación de suelos por riego con aguas residuales

El uso continuo de aguas residuales durante largos períodos puede provocar la acumulación de metales pesados en el suelo y su movilización hacia las partes comestibles de las plantas, además de aumentar la salinidad del suelo, lo que puede hacerlo improductivo. Por lo tanto, es crucial tratar adecuadamente el agua residual para evitar la contaminación en diversos compartimentos del ecosistema (Morgan et al., 2023).

2.4.2. Indicadores de salinidad en el suelo por calidad de agua de riego

El exceso de sales en el agua de riego puede perjudicar tanto al suelo como a las plantas, ya que interfiere con el equilibrio natural del suelo y reduce el rendimiento de los cultivos. De acuerdo con Bhattacharya et al., (2012), la conductividad eléctrica del agua (CE) mide la cantidad total de sales en el agua y es una herramienta eficaz para detectar problemas en la calidad del agua, al identificar el potencial impacto negativo de estas sales.

2.4.3. Indicadores de alcalinidad en el suelo por calidad de agua de riego

Un contenido elevado de sodio determina una condición física inadecuada en el perfil del suelo, reduciendo la infiltración del agua y estimulando condiciones químicas y nutricionales no deseables. La dispersión de agregados y la reducción del tamaño de poros disminuyen la permeabilidad del aire y agua en el suelo, mientras que los iones Ca y Mg contrarrestan los efectos del sodio. La evaluación de la condición de suelo sódico se basa en la Relación de Adsorción de Sodio (RAS) de extracto de pasta saturada (Alvarado, 2011).

2.4.4. Amenaza de toxicidad por reuso de las aguas residuales municipales en riego agrícola

Se refiere a los problemas específicos que pueden surgir en los cultivos debido a la concentración de ciertos iones en la solución del suelo. Entre estos iones, el cloro, el sodio y el boro son particularmente tóxicos cuando se utilizan aguas

residuales para riego. Según Báez (1999), citado por Echeverri (2011), los cultivos, especialmente las plantas leñosas perennes y los frutales, son más susceptibles a altas concentraciones de estos elementos. En la Tabla 1 se proporciona información detallada sobre el grado de restricción asociado a cada uno de estos iones.

Tabla 1. Toxicidad en el riego

| Toxicidad | | | | | |
|---------------------|---------------------|--------|-----------------------------|-----------------|--------|
| Parámetro | | Unidad | Grado de restricción de uso | | |
| | | | Ninguno | Leve o moderado | Severo |
| Sodio (Na) | Riego por gravedad | meq/L | < 3,0 | 3 - 9 | >9 |
| | Riego por aspersión | meq/L | < 3,0 | >3,0 | - |
| Cloruro (Cl) | Riego por gravedad | meq/L | < 4 | 4 – 10 | >10 |
| | Riego por aspersión | meq/L | < 3 | >3 | - |
| Boro (B) | General | meq/L | < 0,7 | 0,7 - 3 | >3,0 |

Fuente: FAO, (1985)

2.4.5. Riesgo microbiológico en aguas residuales

La OMS (2006), expone que los principales riesgos para la salud asociados con el uso de aguas residuales son los patógenos relacionados con la excreta, algunas enfermedades transmitidas por vectores y contaminantes químicos. Estos riesgos describen la probabilidad, bajo circunstancias específicas, de que estos riesgos para la salud afecten negativamente a la salud humana. Algunos patógenos pueden sobrevivir en el medio ambiente el tiempo suficiente para ser transmitidos a las personas. Varios factores ambientales contribuyen a la supervivencia y transmisión de patógenos, como la temperatura, la humedad, la exposición a la luz solar y la presencia de huéspedes intermediarios adecuados.

2.4.6. Verificación y calidad microbiológica del reuso de aguas residuales

El análisis microbiológico es crucial para evaluar la calidad y seguridad de las aguas residuales. Se pueden emplear evidencias microbianas para detectar

posibles peligros ambientales. Las aguas residuales sin tratar contienen una variedad de organismos, incluidos patógenos, cuyas concentraciones pueden aumentar durante brotes de enfermedades. Para evaluar el riesgo, se pueden utilizar indicadores de contaminación fecal, como *E. coli* o coliformes termo tolerantes, como sustitutos de los patógenos (OMS, 2006). Aunque no siempre son precisos, estos indicadores proporcionan una estimación aproximada del riesgo asociado con el uso de las aguas residuales. Es importante recopilar datos locales para evaluar el riesgo y desarrollar estrategias de gestión adaptadas a cada sitio específico.

Uno de los métodos más utilizados para cuantificar estos indicadores es el Número Más Probable (NMP), una técnica estadística que estima la concentración de microorganismos viables en una muestra, a partir de cultivos en medios selectivos y análisis por diluciones seriadas (APHA et al., 2017).

Especial atención debe prestarse cuando el agua tratada está destinada para riego agrícola, pues se debe evitar el contacto directo con el agua residual durante y después de la actividad agrícola, así como con cultivos que puedan estar contaminados (OMS, 2006). En la Tabla 2 se presentan monitoreos de verificación que permiten la aplicación de métodos, procedimientos, pruebas y otras evaluaciones de calidad de agua microbiana para *E. coli* y helmintos.

Tabla 2. Monitoreos de verificación mínima recomendada de los objetivos de desempeño microbiano para el uso de aguas residuales y excretas en la agricultura

| Actividad / Exposición | Parámetros de monitoreo de la calidad del agua | |
|--|--|---|
| Agricultura | E. coli por 100 mL (significado aritmético) | Huevos de helminto por litro (significado aritmético) |
| Riego sin restricción (campos de arroz irrigados por un río cercano) | | |
| Tubérculos (papas y batatas) | $\leq 10^3$ | ≤ 1 |
| Cultivos con hojas (tabaco) | $\leq 10^4$ | |
| Riego por goteo, cultivos de alto crecimiento (viñedos) | $\leq 10^5$ | |
| Riego restringido (cultivos de olivos) | | |
| Agricultura intensiva en mano de obra (plantación de fresas) | $\leq 10^4$ | ≤ 1 |
| Agricultura altamente mecanizada (granjas de maíz) | $\leq 10^5$ | |
| Tanque séptico (Hogares en zonas rurales) | $\leq 10^6$ | |

Fuente: OMS, (2006)

El monitoreo se debe realizar en el punto de uso o en el punto de descarga de efluentes. La frecuencia de monitoreo es la siguiente:

- Áreas urbanas: Una muestra cada dos semanas para E. coli y una muestra por mes para huevos de helmintos.

- Zonas rurales: Una muestra cada mes para E. coli y una muestra cada 1-2 meses para huevos de helmintos.

2.4.7. Requerimientos agroclimáticos y nutricionales del tabaco

El cultivo de tabaco (*Nicotiana tabacum L.*) presenta exigencias específicas en cuanto a condiciones climáticas y disponibilidad de nutrientes, factores determinantes en la calidad de la hoja. La temperatura óptima para el procesamiento y desarrollo de la planta se encuentra en un rango de 20 a 30 °C (Díaz et al., 2019).

En cuanto a la nutrición, el Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación en España (MAPA, 2007), resalta que la cantidad de elementos minerales que requiere el tabaco depende de factores como el tipo de suelo, la materia orgánica, el régimen de riego, la climatología y la producción esperada. Una fertilización media para tabaco tradicional destinado a la industria de cigarrillos incluye: 80-120 kg/ha de Nitrógeno (N), 40-50 kg/ha de Fósforo (P_2O_5), 250-300 kg/ha de Potasio (K_2O) y 60-80 kg/ha de Magnesio (MgO).

Entre estos nutrientes, el nitrógeno es considerado el más relevante, ya que influye tanto en la productividad como en la calidad de las hojas (Marchetti et al., 2006). Su absorción ocurre principalmente en las primeras fases vegetativas, disminuyendo en los últimos estadios del cultivo.

Estos valores de referencia resultan fundamentales en la presente investigación, pues servirán como punto de comparación con los resultados de los análisis fisicoquímicos del efluente tratado, permitiendo evaluar su idoneidad para el riego agrícola del tabaco.

2.5. Viabilidad comercial del reuso de aguas residuales

Desde la perspectiva de Herruzo (2002), la valoración de la viabilidad comercial del reuso de aguas residuales es un instrumento clave dentro de la política ambiental, orientado a asignar valores económicos a los bienes y servicios ambientales para evaluar su aceptación y potencial de adopción en el mercado. Esta valoración económica es fundamental para promover la eficiencia en el uso

de los recursos y fomentar un crecimiento sostenible, permitiendo que las decisiones sobre su implementación sean respaldadas por criterios tanto ambientales como económicos.

2.5.1. Potencial de comercialización del agua residual depurada

Se fundamenta en una serie de aspectos clave que influyen en su viabilidad y aplicabilidad en los mercados. De conformidad con Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA, 2018), la comercialización del agua residual depurada se refiere al proceso que abarca desde la entrega del servicio hasta el momento en que el consumidor final recibe los beneficios de manera directa. El valor económico de este recurso está vinculado a su capacidad para satisfacer necesidades específicas y al bienestar que genera en quienes lo utilizan. Por esta razón, el precio depende de las cualidades percibidas en los beneficios que ofrece. Frente al creciente déficit hídrico a nivel mundial, se han explorado soluciones como la desalinización del agua de mar y el uso de aguas residuales tratadas (Ruiz-Rosa et al., 2020).

2.5.2. Beneficios del agua residual depurada

El aprovechamiento de aguas residuales tratadas presenta una serie de ventajas, entre las cuales destaca el enriquecimiento de nutrientes y materia orgánica en el suelo para favorecer el crecimiento de las plantas. Además, su reutilización conlleva beneficios difíciles de cuantificar económicamente, ya que inciden positivamente en la calidad de vida de la comunidad al mejorar el entorno ambiental, reducir plagas, olores desagradables y focos de infección. Asimismo, facilita el desarrollo de la flora y fauna local, contribuyendo así a la sostenibilidad del ecosistema (Escalante et al., 2014).

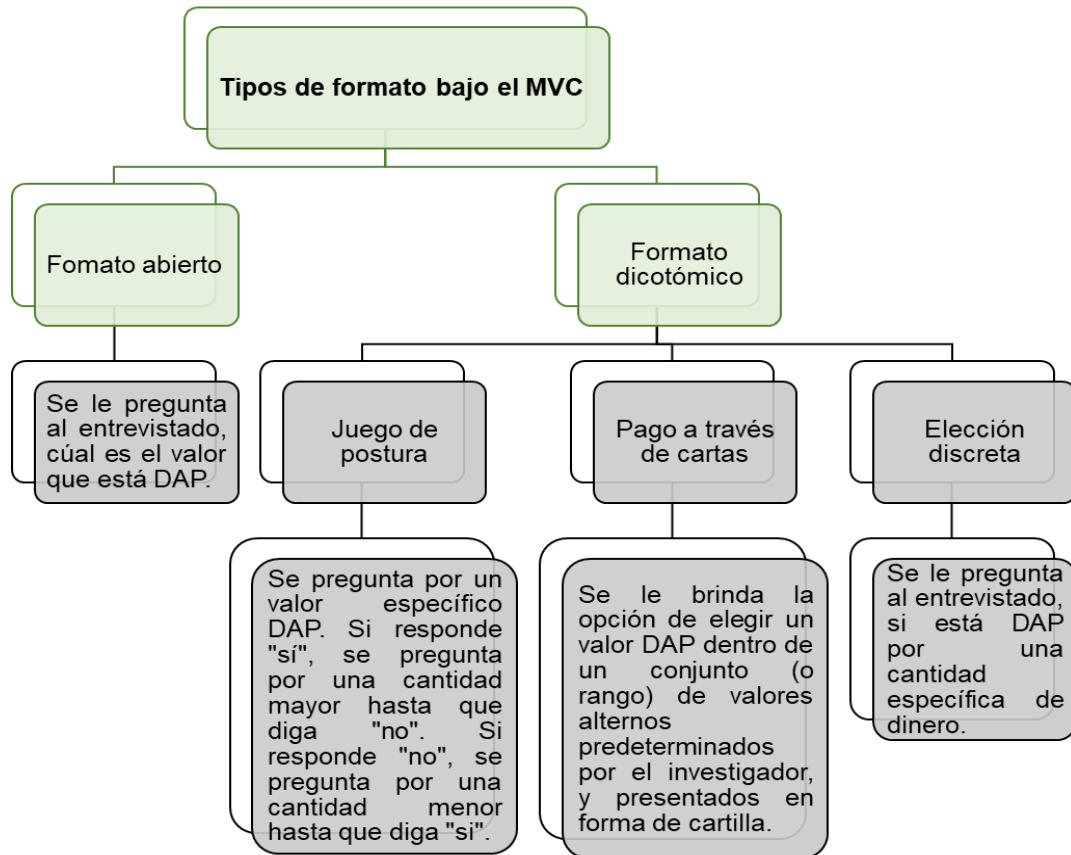
2.5.3. Valoración contingente

El método de valoración contingente (MVC) tiene como propósito obtener de manera directa la disposición a pagar (DAP) de los individuos por un servicio o recurso ambiental (Parra, 2002). La valoración de bienes ambientales considera que su demanda se asemeja a la de los bienes económicos, por lo que se busca

identificar su demanda efectiva. En este contexto, la disposición a pagar se considera una medida confiable para estimar la demanda.

Como se muestra en la Figura 5, el método de valoración contingente presenta diferentes formatos de preguntas utilizados para estimar la disposición a pagar.

Figura 5. Formatos de preguntas bajo MVC



Fuente: Adaptado de Brand, (2017)

2.5.4. Bioeconomía circular y el tratamiento de aguas residuales

No se puede subestimar la importancia de la gestión del agua en la economía de un país, ya que muchas industrias que dependen del agua potable tienen un acceso limitado al recurso agua que pueden disminuir aún más la capacidad de producción y las ganancias. Las economías circulares (EC), que implican la gestión sostenible de residuos y materias primas, tienen un enfoque significativo en los problemas del agua. La reducción, recuperación, reutilización, reciclaje y la

innovación son las seis acciones principales del marco del modelo EC (Smol, 2022; Zarei, 2020). Si bien el concepto de EC aún está emergiendo en el sector del agua, se están realizando investigaciones al respecto. Comparativamente, el sector del agua no ha recibido mucha atención con respecto a las dimensiones y los requisitos de la EC.

Las aguas residuales después del tratamiento se pueden utilizar como una fuente alternativa de agua para su aplicación en la agricultura y el riego. Asimismo, los recursos hídricos pueden tener un uso sostenible disminuyendo el nivel de huella de carbono (Kundu et al., 2022a).

Voulvoulis, (2018) informó una revisión sobre diferentes países: España, Italia, Chipre y Grecia que habían utilizado las aguas residuales tratadas para su riego y fines agrícolas. La falta de conciencia entre las personas de la India propicia que aún exista diferencia entre las aguas residuales tratadas del agua dulce y tienen miedo de usar las aguas residuales tratadas para diferentes aplicaciones agrícolas. Una perspectiva diferente para las aguas residuales tratadas puede ser que genere productos de valor agregado. Incluso las heces y los lodos tratados se pueden utilizar para producir combustible en industrias y transporte (Kundu et al., 2022b).

García, Álvarez, & Sierra (2018) encontraron bacterias en el tratamiento anaeróbico de aguas residuales que sintetizan los poliésteres biodegradables para la producción de bioplásticos (polihidroxialcanoato (PHA)). Estos PHA son fácilmente biodegradables y se consideran un coproducto de los cultivos agrícolas (Somleva et al., 2013).

Se debe realizar una evaluación del ciclo de vida de cualquier producto durante su producción para evaluar la cantidad de aguas residuales generadas durante el proceso. La evaluación del ciclo de vida juega un papel importante en la economía circular para calcular el costo y el beneficio de cada paso de la producción (Veloia, 2015). La reutilización del agua es una oportunidad de ganar-ganar en vista de la economía circular.

La economía circular puede generar nuevos conceptos de regeneración y gestión de aguas residuales. La recuperación de recursos y la producción de energía pueden traer sostenibilidad a Nicaragua y a la región latinoamericana.

Por lo tanto, la recuperación sostenible de los recursos de las aguas residuales puede generar ingresos mediante la producción de productos comercializables que garanticen la seguridad de la reutilización del agua y mantengan los estándares de calidad del agua para aplicaciones específicas y fines económicos (Kundu et al., 2022a).

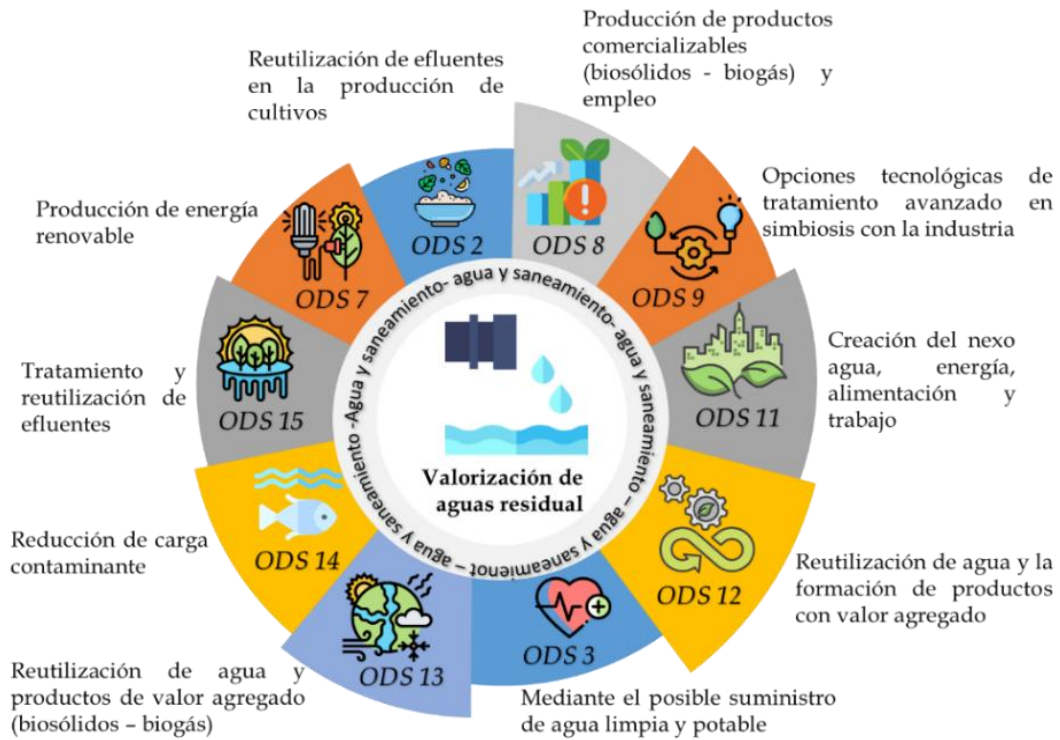
Para la implementación de EC en el sector de las aguas residuales, junto con el avance tecnológico, se debe prestar atención a otros factores como: el económico, social, ambiental, evaluación de riesgos y el balance energético. Además, se requiere una educación, conciencia y comprensión ambiental adecuada relacionada con el principio de EC para la adopción del modelo de EC. Por lo tanto, la implementación de soluciones circulares y sostenibles por parte de empresas y operadores de aguas residuales puede acelerar aún más la transformación hacia un modelo EC (Smol, 2022).

2.5.5. Paradigma de valorización de aguas residuales para mejorar la armonía con los objetivos de desarrollo sostenible

La valorización de las aguas residuales armoniza con el ODS 6 para “garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos”, lo que promueve aún más otros objetivos de desarrollo adecuados al abordar el nexo agua-energía-alimentos.

En la figura se muestra la relación de los recursos integrados en las aguas residuales y el ODS 6 con otros ODS relacionados. Esta información interrelacionada es vital para los encargados de formular políticas, investigadores, profesionales, instituciones públicas sobre el control de la contaminación, la recuperación de nutrientes y recursos, la recuperación de energía y el desarrollo de planes de acción nacionales (Qadir et al., 2020).

Figura 6. Relación del ODS 6 con otros



Fuente: Vilchez et al., (2023)

La aplicación de aguas residuales ricas en nutrientes en la producción de cultivos, la acuaponía y los sistemas de acuicultura mejoran la sostenibilidad alimentaria y también permiten la generación de ingresos a pequeña y gran escala. Este enfoque puede interrelacionarse fácilmente con la meta 2.3 del ODS 2, cuyo objetivo es “duplicar la productividad agrícola y los ingresos de los productores de alimentos a pequeña escala”.

Las aguas residuales tratadas minimizan o eliminan el riesgo de peligros para la salud debido a la contaminación del agua y las enfermedades transmitidas por el agua, contribuyendo así a cumplir el objetivo de una reducción sustancial en el número de muertes y enfermedades por la contaminación del agua de la meta 3.9 (ODS 3).

Por otra parte, se tiene una vinculación de las metas 6.3 con 7.1 y 7.2 de los ODS, es decir, "reducir a la mitad la proporción de aguas residuales no tratadas y aumentar sustancialmente el reciclaje y la reutilización segura a nivel mundial", que promueve el ODS 7 al "garantizar el acceso universal a servicios de energía

asequibles, confiables y modernos" y "aumentar la sostenibilidad de la participación de las energías renovables en el mix energético global", respectivamente, ver figura 2 (Qadir et al., 2020).

Adicionalmente, el ODS 9 (Industria, innovación e infraestructura) sería impulsado con el desarrollo de sistemas de recuperación de subproductos de las aguas residuales (o PTARs sostenibles), considerando que estas unidades son obras de infraestructura.

Los sectores de valorización de aguas residuales pueden contribuir a cumplir con las metas 8.3 y 8.6 del ODS 8 mediante la creación de nuevas empresas pequeñas y medianas, oportunidades de trabajo, generación de ingresos, capacitación adecuada y educación sobre tecnologías de tratamiento de aguas residuales.

Por lo tanto, el enfoque bioeconómico de la valorización de las aguas residuales también puede respaldar la meta 9.3 del ODS 9, cuyo objetivo es "mejorar la industria para hacerla sostenible, con una mayor eficiencia en el uso de los recursos y una mayor adopción de tecnologías y procesos industriales limpios y ambientalmente racionales". Las instalaciones de tratamiento de aguas residuales y el suministro de agua limpia en las ciudades pueden respaldar el objetivo de "reducir el impacto ambiental adverso per cápita de las ciudades, incluso prestando especial atención a la gestión de desechos" que son parte de la meta 11.6 constituido en el ODS 11.

Por otro lado, la recuperación de nutrientes y materia orgánica de las aguas residuales para mejorar la eficiencia de los recursos en el consumo y la producción ayuda a lograr "la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales" que son parte de las metas 12.2 y "reducir sustancialmente la generación de desechos a través de la prevención, reducción, reciclaje y reutilización" de la meta 12.5 (Qadir et al., 2020). Todas las actividades relacionadas con la valorización de las aguas residuales son cruciales para aumentar nuestra capacidad de adaptación al cambio climático en la meta 13.3 del ODS 13. La descarga de efluentes tratados en el cuerpo de agua y la superficie terrestre reduce

significativamente las cargas de nutrientes y otros contaminantes de los ecosistemas acuáticos y terrestres que ayudan a mantener la buena salud de los ecosistemas acuáticos y terrestres que son parte de las metas 14.1 y 15.1 de los ODS (14 y 15). (Ver Anexos, Figura 34, pág. XXII).

CAPÍTULO III

ANÁLISIS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS



3.1. Aforo de caudal

El aforo de caudal constituye un procedimiento fundamental para cuantificar el volumen de efluente generado por un sistema de tratamiento de aguas residuales. A través de esta técnica es posible determinar de manera cuantitativa la condición actual de la descarga y, por lo tanto, disponer de un parámetro clave para evaluar la suficiencia del recurso hídrico frente a las necesidades del cultivo de tabaco.

El caudal es una de las variables más relevantes en estudios de reuso agrícola de aguas depuradas y, a la vez, una de las que presenta mayores retos para su estimación, debido a la variabilidad temporal y a las condiciones hidrológicas propias del entorno.

En este acápite, se muestran los resultados obtenidos en el aforo realizado en la sección hidráulica del cuerpo receptor de la descarga del efluente de la STAR del municipio de Estelí mediante la aplicación de la metodología establecida por la (FAO, 2006).

3.1.1. Metodología

Para determinar el volumen de caudal generado por el efluente, primeramente, se realizó una visita al sitio para identificar la zona de descarga de la STAR de Estelí.

Una vez localizada el área de muestreo, se llevaron a cabo aforos del efluente en un período de ocho días consecutivos, con una duración de 5 horas por día y una frecuencia de medición de cada hora. La información recolectada fue registrada en una ficha de campo, utilizando el formato que se muestra en los anexos (Ver Anexos, Tabla 23, pág. VIII).

Se calculó el flujo de agua en dos puntos clave: aguas arriba, donde únicamente se encuentra el cuerpo receptor, y aguas abajo, donde el efluente se incorpora a este. La diferencia de caudales entre ambos puntos permitió determinar el caudal efectivo disponible para riego.

El aforo se realizó utilizando la ecuación del método del flotador, conforme a lo propuesto por Bello & Pino (2000):

Ecuación 1. Determinación de caudal del efluente por método del flotador

$$Q = \vec{V} * A * 0.85$$

En donde:

Q: Caudal (m³/s)

\vec{V} : Velocidad (m/s)

A: Área (m²)

Nota: Para medir la velocidad se utilizó un objeto flotante que, al ser colocado en el espejo de agua, recorrió cierta distancia, y midiendo el tiempo de desplazamiento de un lugar a otro, se pudo determinar la velocidad.

Ecuación 2. Cálculo de velocidad superficial del flujo

$$\vec{V} = \frac{d}{t} \quad \text{Tomado de (Barreto, 2009)}$$

En donde:

d: Distancia recorrida por el flotador (m)

t: Tiempo que tarda el flotador en recorrer distancia (s)

Ecuación 3. Cálculo del área de la sección transversal (A)

$$A = \sum_{i=1}^n A_i = \sum_{i=1}^n \left(\frac{b_{i1} + b_{i2}}{2} \right) h_i \quad \text{Tomado de (Barreto, 2009)}$$

En donde:

b_{i1}: Base menor del segmento (m)

b_{i2}: Base mayor del segmento (m)

h_i: Profundidad correspondiente al segmento (m)

n: Número de segmentos en que se divide el ancho del cauce

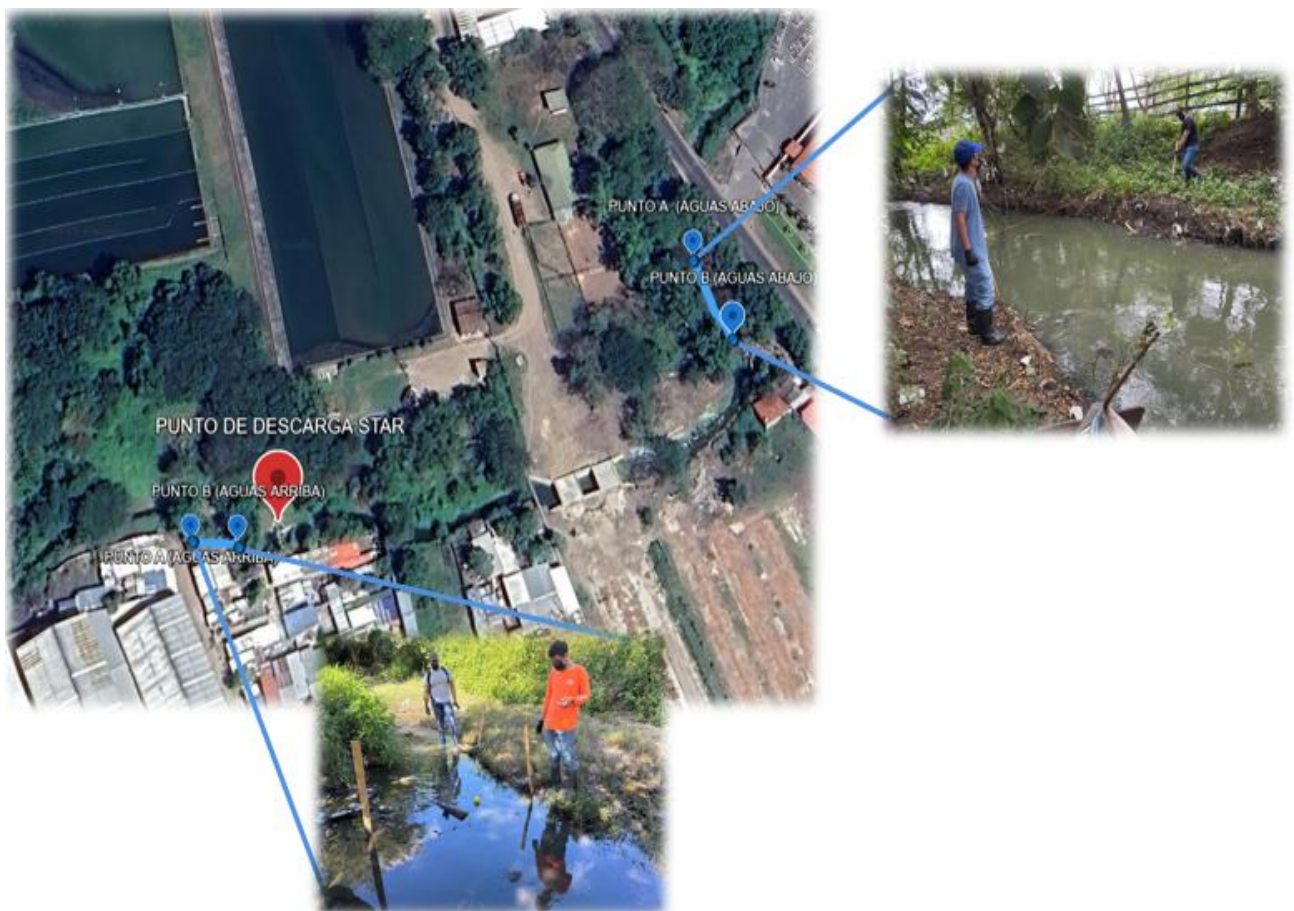
Nota: Si el segmento es triangular, se considera b_{i2} = 0, reduciéndose la fórmula a A_i = (b_i*h_i)/2.

Los datos de aforo fueron procesados y sistematizados utilizando Microsoft Excel, con el objetivo de registrar los caudales medidos y calcular los promedios diarios correspondientes al período de observación. Posteriormente, los resultados se analizaron mediante hidrogramas para evaluar la disponibilidad efectiva del efluente destinado al riego agrícola. Estos valores fueron contrastados con la demanda hídrica estimada para el cultivo de tabaco en el municipio, basada en referencias de valores promedio reportados en la literatura y en las áreas de cultivo declaradas por los agricultores (Ver Anexos, Tabla 10, pág. IX).

3.1.2. Variaciones de caudal

3.1.2.1. Puntos de aforo

Figura 7. Ubicación de los puntos de aforo



Fuente: Adaptado de Google Earth, (2025)

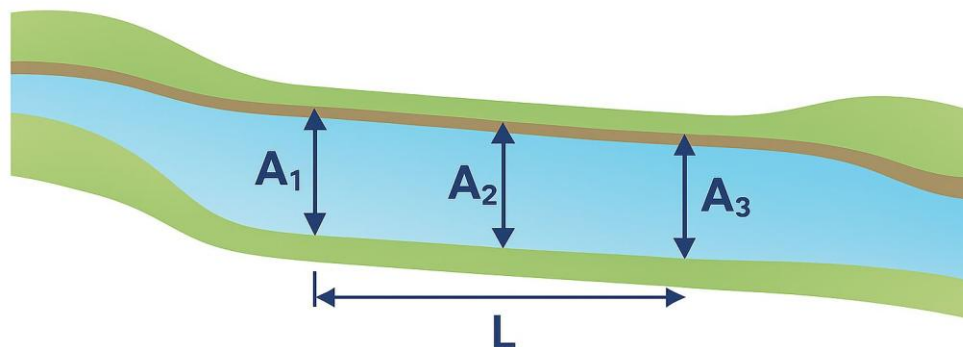
Los puntos de aforo fueron seleccionados considerando las condiciones hidráulicas y de accesibilidad del tramo de estudio. En el caso de los puntos aguas arriba, estos se ubicaron en una zona previa a la descarga del efluente tratado, donde el flujo presenta menor profundidad y ciertas irregularidades por la presencia de vegetación y sedimentos. Aunque no se contaba con tramos completamente rectos de más de 10 metros, se escogieron los sectores más estables y con corriente visible para asegurar lecturas confiables.

Por su parte, los puntos aguas abajo se establecieron a una distancia prudente de la descarga, debido a que en el punto inmediato se observó turbulencia, remolinos y acumulación de sólidos, condiciones que impedían aplicar correctamente el método del flotador. Por ello, se optó por un tramo más alejado, donde el flujo mostraba un comportamiento más uniforme y laminar, adecuado para realizar las mediciones de velocidad y estimar el caudal con mayor precisión.

Esta disposición permitió garantizar que los resultados obtenidos representaran fielmente el comportamiento del efluente descargado por la STAR, evitando errores asociados a interferencias o irregularidades del flujo en la zona de descarga directa.

3.1.2.2. Levantamiento de secciones transversales en los puntos de aforo

Figura 8. Esquema secciones transversales en los tramos de aforo



Fuente: Elaboración propia

Con el objetivo de obtener una representación precisa de las condiciones hidráulicas del punto de estudio, se efectuó el levantamiento de tres secciones transversales aguas arriba y tres aguas abajo del punto de descarga del efluente depurado. Estas secciones se ubicaron estratégicamente para evaluar las variaciones geométricas del tramo y asegurar la representatividad de los resultados.

A partir de las mediciones de profundidad y ancho se determinó el área hidráulica de cada sección, y posteriormente se obtuvo un promedio representativo para cada punto de aforo (aguas arriba y aguas abajo). Dichos valores promedio se utilizaron en la estimación del caudal mediante la aplicación del método del flotador, garantizando mayor precisión en la cuantificación del flujo descargado por la STAR de Estelí. Para la medición de la velocidad superficial del flujo se empleó un objeto flotante constituido por un trozo de madera de aproximadamente 30 cm de largo y 5 cm de espesor, recomendado por la FAO, (2006), por su adecuada estabilidad y visibilidad durante el desplazamiento (Ver Anexos, Figura 44, pág XXVIII.).

A manera ilustrativa, en las Figuras 9 y 10 se presentan los perfiles característicos de las secciones transversales aguas abajo y aguas arriba, respectivamente, mientras que los perfiles detallados y sus cálculos individuales se incluyen en los anexos (Ver Anexos, págs. XVIII-XXI).

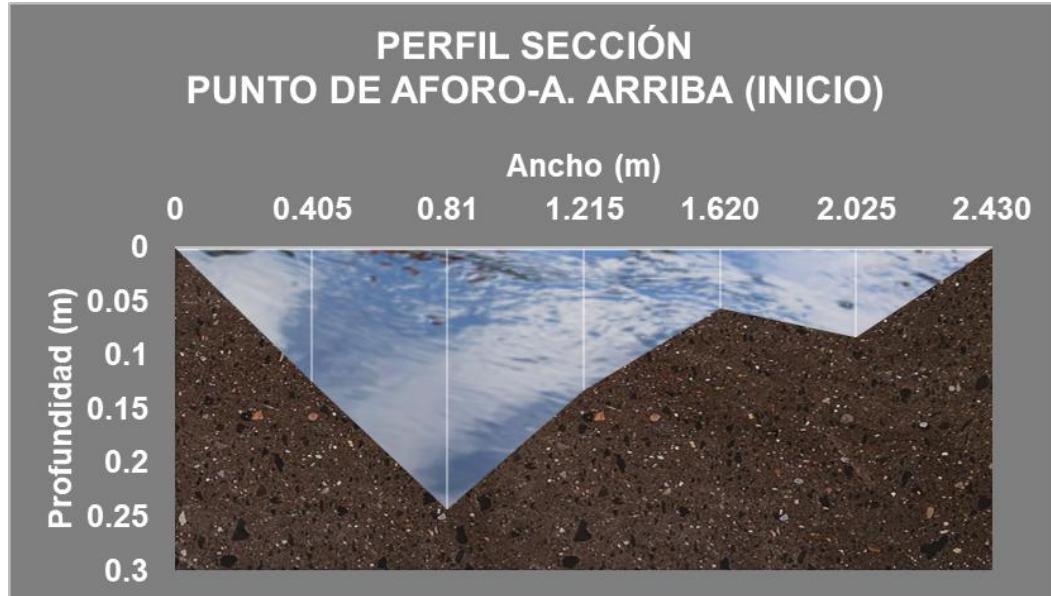
Es importante mencionar que el aforo se realizó durante la época seca, con el propósito de evaluar el caudal mínimo disponible del efluente y verificar si este resultaba suficiente para abastecer la demanda hídrica del cultivo bajo condiciones desfavorables. La elección de este período permite adoptar un enfoque conservador, ya que en ausencia de aportes significativos por precipitación se obtiene una estimación representativa del escenario más crítico. De esta manera, se garantiza que los resultados obtenidos reflejen la capacidad real de la STAR para suministrar agua de riego de forma continua, incluso durante los meses de menor disponibilidad hídrica.

Figura 9. Perfil de sección transversal representativa aguas abajo



Fuente: Elaboración propia

Figura 10. Perfil de sección transversal representativa aguas arriba



Fuente: Elaboración propia

3.1.2.3. Registro de medición de caudales

Los detalles completos de los aforos realizados durante los ocho días de medición, con sus respectivos registros horarios, se presentan en los anexos del documento (Ver Anexos, págs. VII-XVI). En la siguiente tabla se presenta el resumen de los caudales medidos, donde se muestran las variaciones observadas a lo largo del período de muestreo y los valores promedio calculados para cada jornada. Esta información permitió establecer el caudal medio disponible, utilizado posteriormente en el análisis de oferta hídrica destinada al riego del cultivo de tabaco.

Tabla 3. Resumen de resultados de aforo del efluente de la STAR del municipio de Estelí

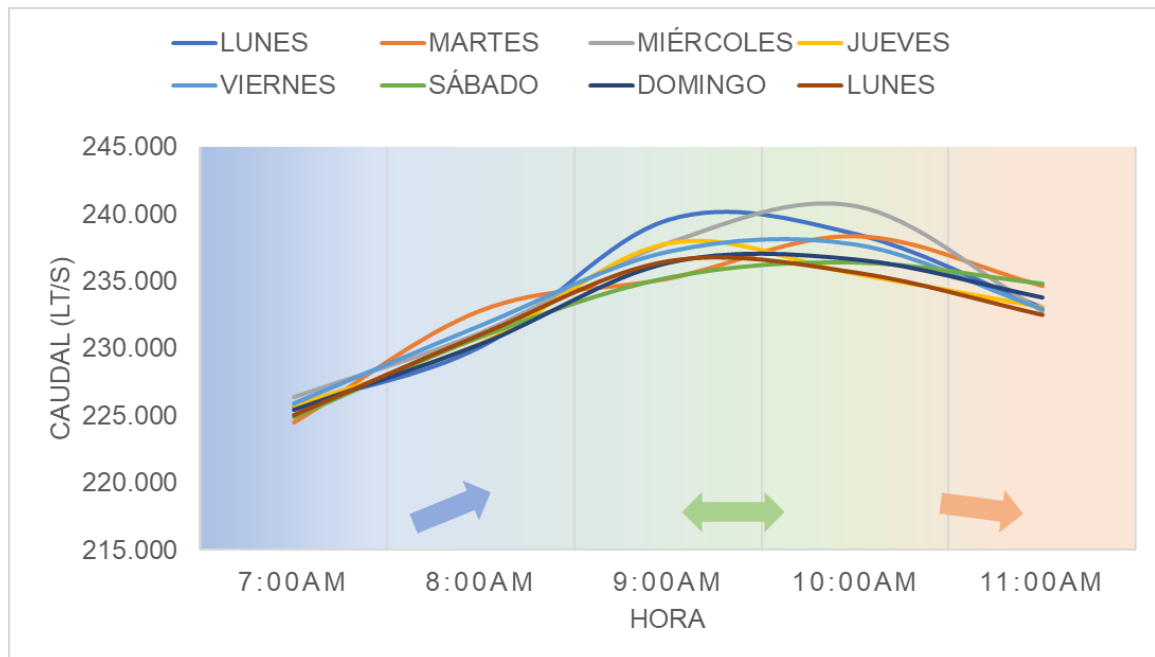
| Hora | Caudal (Lt/s) | | | | | | | | Caudal promedio por hora (Lt/s) |
|------------|---------------|---------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------------------------------|
| | Lunes | Martes | Miércoles | Jueves | Viernes | Sábado | Domingo | Lunes | |
| 7:00 a.m. | 225.684 | 224.515 | 226.392 | 225.716 | 225.915 | 224.876 | 225.446 | 225.014 | 225.445 |
| 8:00 a.m. | 230.144 | 232.840 | 231.205 | 230.385 | 231.723 | 230.876 | 230.354 | 231.035 | 231.070 |
| 9:00 a.m. | 239.564 | 235.201 | 237.855 | 237.849 | 237.187 | 235.288 | 236.397 | 236.499 | 236.980 |
| 10:00 a.m. | 238.513 | 238.351 | 240.614 | 235.578 | 237.720 | 236.420 | 236.652 | 235.655 | 237.438 |
| 11:00 a.m. | 233.040 | 234.659 | 232.800 | 233.066 | 232.921 | 234.835 | 233.812 | 232.492 | 233.453 |

Fuente: Elaboración propia

Con el fin de visualizar el comportamiento del efluente durante el período de aforo, se elaboró un gráfico que representa las fluctuaciones de los caudales promedios por día. En él se observa la estabilidad general del flujo descargado, con ligeras variaciones atribuibles a las condiciones operativas de la planta y a la variabilidad hidráulica propia del sistema.

Este comportamiento refleja una tendencia constante en el caudal de salida, lo que evidencia la eficiencia del tratamiento y la disponibilidad sostenida del recurso hídrico para su aprovechamiento en riego agrícola.

Figura 11. Mediciones de caudal del efluente



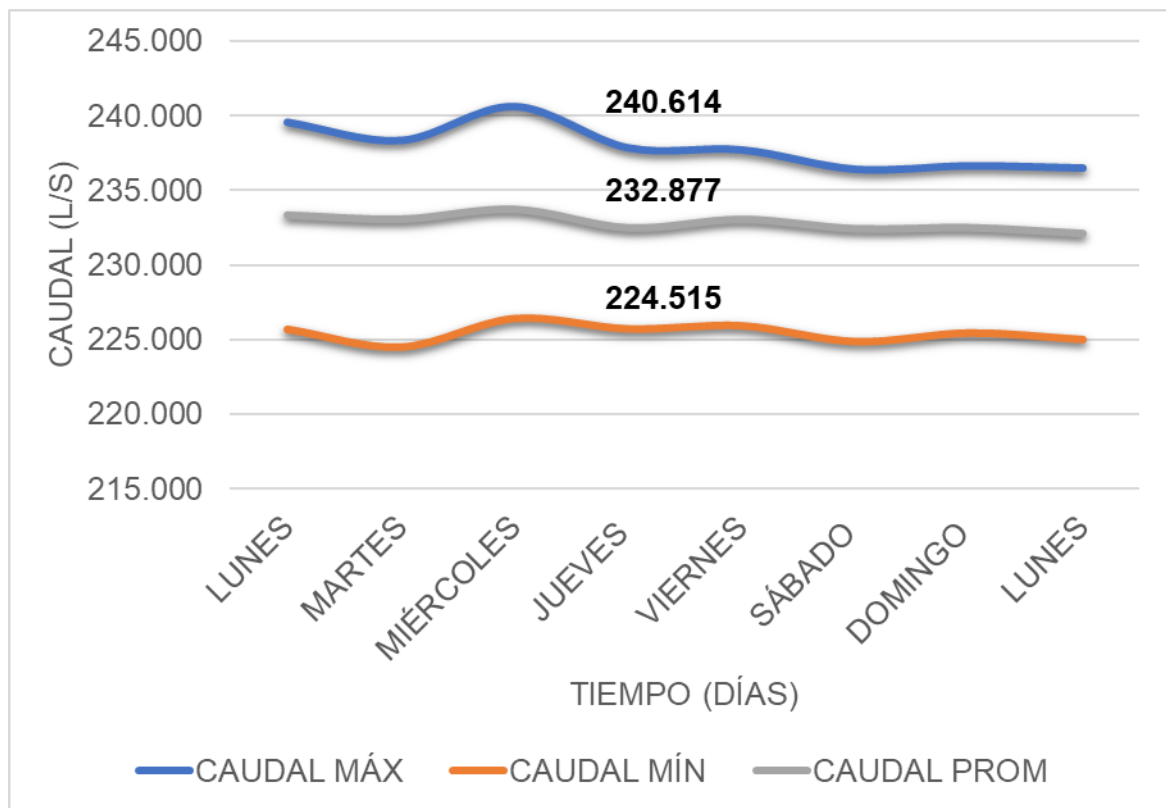
Fuente: Elaboración propia

En el gráfico se muestra el comportamiento de los caudales medidos en la descarga del efluente durante ocho días consecutivos de aforo. En las primeras horas de la mañana, entre las 7:00 a.m. y 9:00 a.m., se observa un ascenso progresivo del caudal, atribuible al incremento de aportes provenientes del sistema de alcantarillado sanitario, producto de las actividades domésticas matutinas de la población urbana.

El caudal alcanza su valor máximo alrededor de las 10:00 a.m., evidenciando el momento de mayor volumen de expulsión de aguas residuales al sistema de tratamiento. Posteriormente, se aprecia una ligera disminución hacia las 11:00 a.m., donde el flujo tiende a estabilizarse, reflejando una condición operativa constante en el sistema.

El comportamiento general del hidrograma evidencia una variabilidad controlada de los caudales durante el período de observación, sin fluctuaciones abruptas entre los diferentes días de medición. Esto sugiere una operación continua y estable de la planta, en la cual los procesos de tratamiento mantienen una descarga sostenida y uniforme.

Figura 12. Caudales promedios máximos, medios y mínimos



Fuente: Elaboración propia

Según los aforos realizados, los caudales en el efluente del STAR presentan valores que oscilan entre 224.515 L/s y 240.614 L/s, con un caudal promedio de 232.877 L/s. Este comportamiento evidencia una descarga estable y constante

del sistema, reflejando la continuidad del flujo tratado a lo largo de los días de monitoreo.

A partir de este valor, y considerando que para el análisis de la demanda hídrica del cultivo la unidad de referencia es el metro cúbico (m³), se procedió a expresar el caudal en estas unidades para facilitar la comparación y el dimensionamiento del recurso disponible.

Con base en ello, se estimó la oferta hídrica efectiva del sistema en escala diaria y anual, bajo el supuesto de operación continua, con el propósito de determinar la disponibilidad real de agua tratada para su potencial aprovechamiento en el riego agrícola.

$$Q_p=232.877\text{L/s} \rightarrow Q_p=0.232877\text{m}^3/\text{s}$$

$$Q_{\text{día}}=Q_p*86,400\text{s/día} \rightarrow Q_{\text{día}}\approx 0.232877\text{m}^3/\text{s}*86,400\text{s/día}\approx 20,178\text{m}^3/\text{día}$$

$$Q_{\text{año}}=Q_{\text{día}}*365\text{días/año} \rightarrow Q_{\text{año}}\approx 20,178\text{m}^3/\text{día}*365\text{días/año}\approx 7,364,970\text{m}^3/\text{año}$$

Se estimó una descarga diaria de 20,178 m³/día y un volumen anual aproximado de 7,364,970 m³/año. Este valor representa la oferta hídrica efectiva del efluente generado por la STAR del municipio de Estelí.

3.1.3. Comparación con la demanda hídrica del cultivo

De acuerdo con la literatura técnica, el cultivo de tabaco requiere una lámina de agua de 1.25 m/año, equivalente a un requerimiento hídrico de 1250 mm/año o por ciclo (Ruíz et al., 2013). Tomando como referencia los resultados de las encuestas aplicadas a los agricultores de la zona de influencia, se determinó que las áreas sembradas de tabaco cercanas a la planta comprenden aproximadamente 31 manzanas, equivalentes a 21.7 hectáreas (217,000 m²).

La demanda volumétrica por un ciclo es:

$$V_{\text{ciclo}}=\text{Lamina de riego} * \text{Área cultivada} = 1.25\text{m/año}*217,000\text{m}^2 = 271,250\text{m}^3/\text{ciclo}$$

Si en la zona se establecen dos ciclos anuales (escenario conservador de mayor exigencia), la demanda anual sería:

$$V_{\text{anual}} = V_{\text{ciclo}} * \text{Número de ciclos} = 271,250\text{m}^3/\text{ciclo} * 2\text{ciclo} = 542,500\text{m}^3/\text{año}$$

El requerimiento hídrico total de dichas superficies asciende a 542,500 m³/año, valor que se encuentra muy por debajo del volumen anual disponible en la descarga del efluente.

En la Tabla 4 se muestra la comparación diaria entre el caudal promedio del efluente y la demanda hídrica estimada del cultivo de tabaco. Los resultados evidencian que en todos los días de aforo la oferta hídrica supera significativamente los requerimientos del cultivo, garantizando la suficiencia del recurso disponible.

Tabla 4. Comparación diaria entre el caudal del efluente y la demanda hídrica del cultivo de tabaco

| Día | Caudal promedio diario del efluente (m³/día) | Demanda hídrica estimada para tabaco (m³/día) | Diferencia (m³/día) | ¿Cubre la demanda? (Sí/No) |
|-----------------|--|---|---------------------------------------|-----------------------------------|
| 1 | 20,164.79 | 1,486.30 | 18,678.49 | Sí |
| 2 | 20,141.01 | 1,486.30 | 18,654.71 | Sí |
| 3 | 20,198.00 | 1,486.30 | 18,711.70 | Sí |
| 4 | 20,089.63 | 1,486.30 | 18,603.33 | Sí |
| 5 | 20,139.25 | 1,486.30 | 18,652.95 | Sí |
| 6 | 20,084.45 | 1,486.30 | 18,598.15 | Sí |
| 7 | 20,090.78 | 1,486.30 | 18,604.48 | Sí |
| 8 | 20,056.82 | 1,486.30 | 18,570.52 | Sí |
| Promedio | 20,120.59 | 1,486.30 | 18,634.29 | Sí |

Fuente: Elaboración propia

En consecuencia, el caudal generado por la STAR satisface ampliamente la demanda hídrica de los cultivos de tabaco en la zona, incluso considerando posibles pérdidas por infiltración o evaporación.

Referente a la comparación oferta–demanda y suficiencia:

$$R = \frac{Q_{\text{año}}}{V_{\text{anual}}}$$

$$R = \frac{7,364,970 \text{ m}^3/\text{año}}{542,500 \text{ m}^3/\text{año}} \approx 13.58 \quad \rightarrow \quad \% \text{Uso} = \frac{542,500 \text{ m}^3/\text{año}}{7,364,970 \text{ m}^3/\text{año}} * 100 \approx 7.37\%$$

La relación entre la oferta y la demanda se determinó mediante el índice ($R = Q_{\text{año}}/V_{\text{anual}}$), donde $Q_{\text{año}}$ representa el volumen anual disponible del efluente tratado y V_{anual} el volumen de agua requerido por el área cultivada. Este índice permite establecer el grado de suficiencia del recurso:

$R > 1$ indica excedente de agua;

$R = 1$ equilibrio;

$R < 1$ déficit hídrico.

En el presente análisis, el valor obtenido ($R \approx 13.58$) evidencia que el volumen anual del efluente tratado supera más de veinte veces la demanda hídrica total de las 31 manzanas de cultivo de tabaco evaluadas. Incluso al considerar dos ciclos agrícolas por año, el consumo estimado representa apenas un 7.37 % de la oferta disponible, lo que confirma la capacidad hidráulica suficiente del sistema y la viabilidad técnica del reuso del efluente tratado como fuente alternativa para el riego agrícola en el municipio de Estelí.

3.1.4. Conclusión del objetivo 1

El efluente del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales (STAR) del municipio de Estelí presenta una oferta hídrica anual estimada de 7,364,970 m³, frente a una demanda hídrica total de 542,500 m³ por año correspondiente a las 31 manzanas de cultivo de tabaco evaluadas. La relación obtenida ($R \approx 13.58$) y el porcentaje de uso del 7.37 % reflejan una amplia suficiencia del recurso disponible para fines de riego agrícola.

Este resultado confirma que el efluente del STAR cumple con la capacidad hídrica necesaria para garantizar un suministro continuo, estable y seguro,

consolidándose como una fuente complementaria técnicamente viable dentro de las estrategias de aprovechamiento sostenible del agua en el municipio. Asimismo, la cuantificación de la oferta y su correspondencia con la demanda brindan una base técnica confiable para respaldar los análisis de idoneidad agronómica, calidad del agua y aceptación social, orientados a la implementación del reuso agrícola como alternativa sostenible de gestión del recurso hídrico en Estelí.

3.2. Análisis físico-químicos y microbiológico del efluente

El análisis fisicoquímico constituye una herramienta fundamental para determinar la calidad del efluente y valorar su conformidad con los estándares establecidos en la NTON 05 027 05, (2006). Mediante este estudio se identifican los parámetros que definen la composición del agua como sólidos, nutrientes, materia orgánica y sales disueltas, los cuales permiten evaluar su aptitud para el reuso agrícola bajo los criterios de la FAO, (1985) y la OMS, (2006).

La caracterización de estos componentes resulta esencial para comprender el comportamiento del efluente dentro del sistema y su posible incidencia sobre el suelo y los cultivos. De esta manera, el análisis fisicoquímico no solo verifica el cumplimiento normativo, sino que también proporciona una base técnica para estimar el potencial de aprovechamiento del recurso en el riego del cultivo de tabaco.

En este apartado se presentan los resultados obtenidos a partir de los muestreos compuestos del efluente del sistema STAR del municipio de Estelí, con el propósito de establecer su calidad y determinar su viabilidad de uso dentro de un enfoque de reuso agrícola sostenible.

3.2.1. Metodología

El muestreo se realizó exclusivamente en la descarga del efluente de la STAR de Estelí para caracterizar adecuadamente sus propiedades. Durante un periodo de tres días, con sesiones de muestreo de 10 horas diarias, se recolectaron muestras compuestas. Estas se generaron mediante la mezcla homogénea de muestras puntuales recolectadas a intervalos de una hora.

Se determinó la cantidad de muestras recolectadas por hora mediante el modelo presentado por Villada (2014):

Ecuación 4. Toma de muestras en el efluente

$$V_i = \frac{(Q_i * V)}{(Q_p * n)}$$

En donde:

Vi: Volumen de alícuota de muestra simple (L)

Qi: Caudal a la hora de la muestra simple (L/s)

V: Volumen total del recipiente (L)

Qp: Caudal promedio (L/s)

n: Número de muestras integrales tomadas a las diferentes horas

Para el desarrollo de los cálculos, se aplicaron las siguientes ecuaciones, fundamentales para la estimación del caudal y la determinación del volumen de muestra proporcional plasmados una tabla de registro (Ver Anexos, Tabla 42, pág. XVIII).

Ecuación 5. Cálculo del caudal a la hora de la muestra simple

$$Q_i = V_{med} * A \quad \text{Tomado de (Villada, 2014)}$$

En donde:

V_{med}: Velocidad media del flujo (L/s), obtenida por el método del flotador

A: Área de la sección transversal del río en ese momento (m²)

Ecuación 6. Cálculo del caudal promedio (L/s)

$$Q_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i \quad \text{Tomado de (Villada, 2014)}$$

Nota: Es decir el promedio aritmético de todos los caudales Q_i medidos durante el periodo de muestreo

En esta etapa, se analizaron las muestras recolectadas, se midieron en campo la conductividad eléctrica y la temperatura. Los demás parámetros fueron enviados a los laboratorios del Programa de Investigación Estudios Nacionales y Servicios del Ambiente (PIENSA) para determinar sus concentraciones. Esta actividad se realizó en tres ocasiones para determinar la desviación estándar de los resultados, así como poder proyectar el uso en el tiempo.

Para valorar la calidad del efluente, se medieron diversos parámetros clave que reflejarán tanto sus características físico-químicas como biológicas esenciales para determinar la idoneidad del efluente para su reutilización. La tabla 3 detalla los parámetros que se evaluaron en el agua residual depurada mediante los muestreos, las unidades correspondientes y los métodos que se emplearon para cada uno de ellos.

Tabla 5. Parámetros físico-químicos y bacteriológicos a evaluar para determinar la calidad del efluente

| Parámetro | Unidades | Método SM/EPA |
|------------------|---------------------|---------------|
| pH | Unidades de pH | SM 4500-H B |
| Temperatura | °C | In situ |
| DBO ₅ | mgO ₂ /L | SM-5210-B |
| E-coli | NMP/ 100mL | 9222-H |
| CE | dS/m | In situ |
| Calcio | mg/L | SM-3500-B |
| CO ₃ | mg/L | SM 2320-B |
| HCO ₃ | mg/L | SM 2320-B |
| Cloruro | mg/L | SM-4500-D |
| Sodio | mg/L | ISE-121 |
| Nitrógeno | mg/L | 4500-B |
| Fósforo | mg/L | 4500-C |
| Potasio | mg/L | SM-3500-C |
| Magnesio | mg/L | SM-3500-B |

Fuente: Elaboración propia

Se examinaron los resultados de laboratorio de los muestreos del efluente según lo establecido en las normativas nacionales e internacionales para regular el reuso de las aguas residuales depuradas en riego agrícola.

La tabla 4 presenta los parámetros de calidad que se evaluaron en el agua y sus límites máximos permisibles junto con las normativas correspondientes que regulan cada uno de ellos.

Tabla 6. Valores máximos permisibles según normativas

| Parámetro | Unidades | Limite máximo permisible | Normativa |
|------------------------|-----------------|---------------------------------|--|
| pH | Unidades de pH | 6-9 | Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021 |
| Temperatura | °C | 20-30 | Según cultivo |
| DBO5 | mgO2/L | 200 | NTON 05 027-05 (2006) |
| E-coli | NMP/ 100mL | 1*10 ⁴ | OMS (2006) |
| CE | dS/m | (200mo) | NTON 05 027-05 (2006) |
| Calcio | mg/L | N/E | Según cultivo |
| CO₃ | mg/L | N/E | N.A. |
| HCO₃ | mg/L | N/E | N.A. |
| Cloruro | mg/L | 4-10 | FAO (1985) |
| Sodio | mg/L | 3-9 | |
| Nitrógeno | mg/L | 15 | NTON 05 027-05 (2006) |
| Fósforo | mg/L | 5 | |
| Potasio | mg/L | N/E | Según cultivo |
| Magnesio | mg/L | N/E | |

Fuente: Elaboración propia

3.2.2. Muestreos compuestos

3.2.2.1. Recolección y toma de muestras de parámetros físico-químicos

Con el objetivo de cuantificar el caudal instantáneo del efluente en el punto de descarga, se realizaron aforos mediante el método del flotador en dos secciones del cauce: una ubicada aguas arriba y otras aguas abajo del punto de muestreo. A partir de las mediciones de tiempo y longitud del tramo se determinaron las velocidades medias y, con las áreas transversales obtenidas en campo, se calcularon los caudales horarios correspondientes.

Paralelamente, se efectuó la recolección de muestras compuestas del efluente, con el fin de obtener una muestra representativa de las variaciones del flujo a lo largo de la jornada. Es importante destacar que la muestra final corresponde al efluente ya incorporado al cauce receptor, es decir, al flujo resultante después de la mezcla con el cuerpo de agua donde se realiza la descarga, lo cual permite caracterizar las condiciones reales del agua en el punto de impacto inmediato (Ver Anexos, Figura 45-46, pág. XXIX). Para ello, se tomaron submuestras cada hora, en volúmenes proporcionales al caudal medido en cada intervalo, hasta completar un volumen total de 4 litros. Las submuestras fueron recolectadas en un recipiente esterilizado, previamente acondicionado y mantenido bajo refrigeración durante todo el proceso de muestreo (Ver Anexos, Figura 47, pág. XXX), con el propósito de conservar las características físico-químicas originales del agua hasta su análisis en laboratorio.

Esta actividad de aforo y recolección de muestras se repitió en tres ocasiones, con un intervalo de dos semanas entre cada campaña, con el fin de estimar la desviación estándar de los resultados, evaluar la estabilidad del sistema y proyectar el comportamiento del efluente en el tiempo. Esta frecuencia también se fundamenta en las recomendaciones de la OMS (2006), que establece que el monitoreo debe realizarse en el punto de descarga o en el punto de uso del efluente, indicando que, para áreas urbanas, se debe recolectar una muestra cada dos semanas para *E. coli*, lineamientos que fueron tomados como referencia para el diseño del presente programa de muestreo.

En las siguientes tablas se presentan los resultados de los aforos realizados, donde se detallan las velocidades promedio registradas aguas arriba y aguas abajo, los caudales parciales, el caudal promedio horario y el volumen recolectado correspondiente a cada intervalo de muestreo.

Tabla 7. Registro de aforo y volumen recolectado del efluente-primera jornada de muestreo

| Hora | Vel. (m/s) A.Ab. | Vel. (m/s) A. Arr. | Área trans. (m ²)A.Ab. | Área trans. (m ²)A.Arr. | Caudal Qi (L/s) A.Ab. | Caudal Qi (L/s) A.Arr. | Caudal Qi efluente (L/s) | Caudal Qp efluente (L/s) | Volumen del recipiente (L) | N | Volumen total deseado (mL) | Volumen recolectado Vi (mL) |
|---------|------------------|--------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|----|----------------------------|-----------------------------|
| 7:00am | 0.4280 | 0.1590 | 0.7285 | 0.2830 | 265.0283 | 38.2109 | 226.8173 | 221.2923 | 4 | 10 | 4000 | 409.9868 |
| 8:00am | 0.4580 | 0.1650 | 0.7285 | 0.2830 | 283.6051 | 39.7664 | 243.8386 | 221.2923 | 4 | 10 | 4000 | 440.7538 |
| 9:00am | 0.4640 | 0.1640 | 0.7285 | 0.2830 | 287.3204 | 39.3708 | 247.9495 | 221.2923 | 4 | 10 | 4000 | 448.1846 |
| 10:00am | 0.4380 | 0.1620 | 0.7285 | 0.2830 | 271.2206 | 38.8954 | 232.3251 | 221.2923 | 4 | 10 | 4000 | 419.9425 |
| 11:00am | 0.4250 | 0.1600 | 0.7285 | 0.2830 | 263.1706 | 38.4428 | 224.7278 | 221.2923 | 4 | 10 | 4000 | 406.2099 |
| 12:00pm | 0.4150 | 0.1580 | 0.7285 | 0.2830 | 256.9784 | 38.0060 | 218.9715 | 221.2923 | 4 | 10 | 4000 | 395.8049 |
| 1:00pm | 0.4050 | 0.1560 | 0.7285 | 0.2830 | 250.7861 | 37.5250 | 213.2603 | 221.2923 | 4 | 10 | 4000 | 385.4817 |
| 2:00pm | 0.3950 | 0.1550 | 0.7285 | 0.2830 | 244.5939 | 37.2852 | 207.3086 | 221.2923 | 4 | 10 | 4000 | 374.7236 |
| 3:00pm | 0.3850 | 0.1530 | 0.7285 | 0.2830 | 238.4016 | 36.8041 | 201.5975 | 221.2923 | 4 | 10 | 4000 | 364.4003 |
| 4:00pm | 0.3750 | 0.1500 | 0.7285 | 0.2830 | 232.2094 | 36.0825 | 196.1269 | 221.2923 | 4 | 10 | 4000 | 354.5119 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8. Registro de aforo y volumen recolectado del efluente-segunda jornada de muestreo

| Hora | Vel. (m/s) A.Ab. | Vel. (m/s) A.Arr. | Área trans. (m ²)A.Ab. | Área trans. (m ²)A.Arr. | Caudal Qi (L/s) A.Ab. | Caudal Qi (L/s) A.Arr. | Caudal Qi Efluente (L/s) | Caudal Qp Efluente (L/s) | Volumen del recipiente (L) | n | Volumen total deseado (mL) | Volumen recolectado Vi (mL) |
|---------|------------------------|-------------------------|--|---|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|----|-------------------------------------|-----------------------------------|
| 7:00am | 0.4600 | 0.1700 | 0.7285 | 0.2830 | 284.8435 | 40.8935 | 243.9500 | 253.7552 | 4 | 10 | 4000 | 384.5438 |
| 8:00am | 0.4700 | 0.1700 | 0.7285 | 0.2830 | 291.0358 | 40.8935 | 250.1423 | 253.7552 | 4 | 10 | 4000 | 394.3048 |
| 9:00am | 0.4900 | 0.1750 | 0.7285 | 0.2830 | 303.4203 | 42.0962 | 261.3240 | 253.7552 | 4 | 10 | 4000 | 411.9309 |
| 10:00am | 0.5200 | 0.1800 | 0.7285 | 0.2830 | 321.9970 | 43.2990 | 278.6980 | 253.7552 | 4 | 10 | 4000 | 439.3179 |
| 11:00am | 0.5400 | 0.1850 | 0.7285 | 0.2830 | 334.3815 | 44.5017 | 289.8798 | 253.7552 | 4 | 10 | 4000 | 456.9439 |
| 12:00pm | 0.5000 | 0.1800 | 0.7285 | 0.2830 | 309.6125 | 43.2990 | 266.3135 | 253.7552 | 4 | 10 | 4000 | 419.7959 |
| 1:00pm | 0.4800 | 0.1750 | 0.7285 | 0.2830 | 297.2280 | 42.0962 | 255.1318 | 253.7552 | 4 | 10 | 4000 | 402.1699 |
| 2:00pm | 0.4600 | 0.1700 | 0.7285 | 0.2830 | 284.8435 | 40.8935 | 243.9500 | 253.7552 | 4 | 10 | 4000 | 384.5438 |
| 3:00pm | 0.4400 | 0.1650 | 0.7285 | 0.2830 | 272.4590 | 39.6907 | 232.7683 | 253.7552 | 4 | 10 | 4000 | 366.9178 |
| 4:00pm | 0.4100 | 0.1600 | 0.7285 | 0.2830 | 253.8823 | 38.4880 | 215.3943 | 253.7552 | 4 | 10 | 4000 | 339.5308 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9. Registro de aforo y volumen recolectado del efluente-tercera jornada de muestreo

| Hora | Vel. (m/s) A.Ab. | Vel. (m/s) A.Arr. | Área trans. (m ²)A.Ab. | Área trans. (m ²)A.Arr. | Caudal Qi (L/s) A.Ab. | Caudal Qi (L/s) A.Arr. | Caudal Qi Efluente (L/s) | Caudal Qp Efluente (L/s) | Volumen del recipiente (L) | n | Volumen total deseado (mL) | Volumen recolectado Vi (mL) |
|---------|------------------------|-------------------------|--|---|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|----|-------------------------------------|-----------------------------------|
| 7:00am | 0.5200 | 0.1800 | 0.7285 | 0.2830 | 321.9970 | 43.299 | 278.6980 | 252.5346 | 4 | 10 | 4000 | 441.4413 |
| 8:00am | 0.5600 | 0.1900 | 0.7285 | 0.2830 | 346.7660 | 45.7045 | 301.0615 | 252.5346 | 4 | 10 | 4000 | 476.8638 |
| 9:00am | 0.5800 | 0.1950 | 0.7285 | 0.2830 | 359.1505 | 46.9072 | 312.2433 | 252.5346 | 4 | 10 | 4000 | 494.5750 |
| 10:00am | 0.5000 | 0.1850 | 0.7285 | 0.2830 | 309.6125 | 44.5017 | 265.1108 | 252.5346 | 4 | 10 | 4000 | 419.9199 |
| 11:00am | 0.4800 | 0.1800 | 0.7285 | 0.2830 | 297.2280 | 43.2990 | 253.9290 | 252.5346 | 4 | 10 | 4000 | 402.2086 |
| 12:00pm | 0.4600 | 0.1750 | 0.7285 | 0.2830 | 284.8435 | 42.0962 | 242.7473 | 252.5346 | 4 | 10 | 4000 | 384.4974 |
| 1:00pm | 0.4500 | 0.1700 | 0.7285 | 0.2830 | 278.6513 | 40.8935 | 237.7578 | 252.5346 | 4 | 10 | 4000 | 376.5943 |
| 2:00pm | 0.4300 | 0.1650 | 0.7285 | 0.2830 | 266.2668 | 39.6907 | 226.5760 | 252.5346 | 4 | 10 | 4000 | 358.8831 |
| 3:00pm | 0.4000 | 0.1600 | 0.7285 | 0.2830 | 247.6900 | 38.4880 | 209.2020 | 252.5346 | 4 | 10 | 4000 | 331.3637 |
| 4:00pm | 0.3800 | 0.1550 | 0.7285 | 0.2830 | 235.3055 | 37.2852 | 198.0203 | 252.5346 | 4 | 10 | 4000 | 313.6524 |

Fuente: Elaboración propia

Los tres muestreos realizados evidencian que el efluente mantiene un comportamiento hidráulico estable, aunque con variaciones esperadas entre jornadas. El caudal promedio de la primera medición fue de 221.29 L/s, mientras que en las dos jornadas posteriores aumentó a 253.76 L/s y 252.53 L/s.

Este incremento es coherente con las lluvias inesperadas registradas durante el periodo de estudio, las cuales generaron mayor aporte hídrico al sistema y, por tanto, un aumento temporal del caudal descargado. Pese a estas variaciones, las velocidades, caudales parciales y caudal promedio se comportaron de manera consistente y sin fluctuaciones abruptas.

La toma de muestras compuestas se efectuó correctamente en las tres jornadas, con volúmenes ajustados al caudal horario para obtener los 4 litros requeridos, garantizando representatividad en los análisis posteriores.

Los resultados confirman que el sistema mantiene un régimen de descarga estable, y que las variaciones observadas responden a condiciones climáticas externas propias del periodo de monitoreo.

3.2.2.2. Resultados de los análisis Físico-Químicos y microbiológicos del efluente

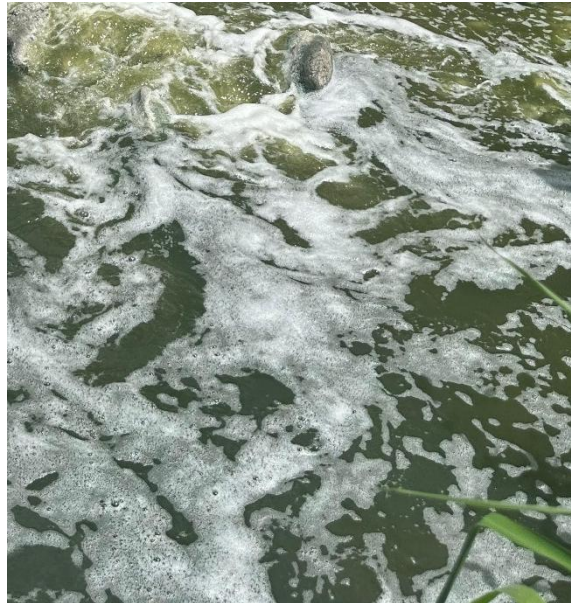
Durante la recolección de las muestras destinadas a los análisis de laboratorio se observaron variaciones físicas notables en el efluente descargado por la STAR del municipio de Estelí, especialmente en el color y en la presencia de compuestos detergentes. Estas características están asociadas a descargas de origen industrial presentes en el área de influencia, las cuales pueden aportar sustancias químicas y tensioactivos que modifican las propiedades visibles del flujo (Ver Figura 13).

Las muestras fueron recolectadas, preservadas y transportadas siguiendo los protocolos establecidos para garantizar la integridad de los parámetros analizados. La conductividad eléctrica (CE) y la temperatura del efluente se midieron in situ en el punto de muestreo (Ver Anexo, Figura 49, pág. XXXI) mientras que el resto de los análisis físico-químicos y microbiológicos fueron

realizados posteriormente en el Laboratorio PIENSA-UNI, bajo condiciones controladas y conforme a los métodos normados, los resultados detallados de estos muestreos se presentan en (Anexos, Figuras 50-52, pág. XXXII-XXXIV).

Los parámetros evaluados permiten caracterizar la calidad del efluente descargado por la STAR Estelí y establecer una línea base confiable y representativa de su comportamiento durante el periodo de estudio. Esta información es fundamental para comprender la variabilidad del efluente, identificar patrones asociados a las actividades urbanas e industriales, y valorar su aptitud para posibles usos en riego agrícola.

Figura 13. Apariencia del efluente con presencia de compuestos detergentes.



Fuente: Propia

A partir de las muestras compuestas recolectadas en las tres jornadas de muestreo y posteriormente analizadas en el laboratorio PIENSA-UNI, se obtuvieron los valores correspondientes a los parámetros físico-químicos y microbiológicos necesarios para caracterizar la calidad del efluente descargado por la STAR de Estelí. Estos resultados permiten evaluar el comportamiento del efluente durante el periodo de estudio y constituyen la base para valorar su potencial uso en actividades de riego agrícola.

En la siguiente tabla se presentan los valores obtenidos para cada uno de los parámetros analizados en los tres muestreos realizados, incluyendo indicadores de calidad como pH, conductividad eléctrica (CE), nutrientes, detergentes y parámetros microbiológicos. La información sintetizada permite identificar variaciones entre jornadas y establecer el estado general del efluente en términos de aptitud y estabilidad durante el periodo evaluado.

Tabla 10. Resultados experimentales de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos para determinar la calidad del efluente

| Parámetro | Unidad | Muestreo | | | Estadística descriptiva | | | |
|------------------|----------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|-------|---------------------|
| | | 1 | 2 | 3 | VAR | DESV | CV | MEDIA |
| pH | U de pH | 6.18 | 6.03 | 6.270 | 0.015 | 0.121 | 1.9% | 6.160 |
| T | °C | 24.70 | 23.90 | 22.40 | 1.363 | 1.168 | 4.9% | 23.667 |
| HCO ₃ | mg/L | 3.45 | 3.14 | 3.01 | 0.051 | 0.226 | 7.0% | 3.200 |
| CO ₃ | mg/L | <0.40 | <0.40 | <0.40 | - | - | - | 0.200 |
| DBO ₅ | mg/L | 61.32 | 57.19 | 63.85 | 11.302 | 3.362 | 5.5% | 60.787 |
| CE | µS/cm | 512.00 | 494.00 | 528.40 | 296.05 | 17.206 | 3.3% | 511.46 |
| Cl | mg/L | 37.20 | 35.00 | 38.12 | 2.570 | 1.603 | 4.3% | 36.773 |
| Ca | mg/L | 66.10 | 63.73 | 68.44 | 5.546 | 2.355 | 3.5% | 66.090 |
| Na | mg/L | 40.25 | 37.75 | 42.1 | 4.766 | 2.183 | 5.4% | 40.033 |
| N | mg/L | 32.90 | 29.31 | 34.55 | 7.178 | 2.679 | 8.3% | 32.253 |
| Mg | mg/L | 40.12 | 38.62 | 42.80 | 4.484 | 2.118 | 5.2% | 40.513 |
| P | mg/L | 1.95 | 1.85 | 2.10 | 0.016 | 0.126 | 6.4% | 1.967 |
| K | mg/L | 6.55 | 6.30 | 6.9 | 0.091 | 0.301 | 4.5% | 6.583 |
| E. coli | NMP/ 100 mL | 1.6×10 ⁴ | 1.1×10 ⁴ | 2.1×10 ⁴ | 2.5×10 ⁷ | 5.0×10 ³ | 25.5% | 1.6×10 ⁴ |

Fuente: Elaboración propia

Parámetros físico-químicos

El pH presentó una ligera fluctuación entre 6.03 y 6.27, con un CV de 1.97 %, reflejando una acidez estable característica de efluentes con presencia de detergentes y residuos domésticos.

La temperatura, medida in situ, varió entre 24.7 y 22.4 °C con un CV de 4.93 %, atribuible a cambios ambientales propios de las diferentes fechas de muestreo.

La alcalinidad medida como bicarbonato mostró valores entre 3.01 y 3.45 mg/L, con una variabilidad baja (CV = 7.06 %), mientras que el carbonato (CO_3^{2-}) permaneció por debajo del límite de detección en los tres muestreos (<0.40 mg/L). Debido a ello, no fue posible calcular varianza o desviación estándar, y únicamente se reporta el valor de referencia del método.

En cuanto a materia orgánica, la DBO_5 mostró un incremento progresivo entre muestreos (57.19 a 63.85 mg/L), aunque con un CV reducido (5.53 %), lo que indica que, pese a la variación, el comportamiento general del parámetro es consistente y sin fluctuaciones abruptas.

Parámetros iónicos y de sales

Los valores de conductividad eléctrica oscilaron entre 494 y 528.4 $\mu\text{S}/\text{cm}$, con una variabilidad baja (CV = 3.36 %), lo cual refleja que la carga iónica del efluente es estable y típica de descargas urbanas con aporte industrial ligero.

Los iones mayoritarios—cloruros, calcio, sodio, magnesio y potasio—presentaron CV entre 3.5 % y 5.5 %, lo cual confirma que su concentración no experimentó cambios significativos entre muestreos y que el efluente mantiene una composición química relativamente constante.

El fósforo mostró un comportamiento similar (CV = 6.40 %), lo que sugiere que las descargas de detergentes y compuestos fosfatados se mantuvieron dentro de un mismo rango durante todo el periodo monitoreado.

Nutrientes y microbiología

El nitrógeno total fue uno de los parámetros con mayor variación relativa (CV = 8.31 %), aunque sigue siendo una variabilidad aceptable y normal en efluentes donde la carga orgánica y el arrastre superficial pueden fluctuar.

El parámetro con mayor variabilidad fue E. coli, con un CV del 25.50 %. Este comportamiento es esperado, ya que los indicadores microbiológicos suelen presentar fluctuaciones amplias derivadas de cambios en la carga fecal, temperatura, turbulencia o arrastre de sólidos, especialmente en sistemas abiertos y expuestos a lluvias recientes. Aun con esa variabilidad, los valores se mantuvieron dentro del orden de 10^4 NMP/100 mL en todos los muestreos, lo cual indica una tendencia consistente.

3.2.2.3. Cumplimiento de los parámetros evaluados respecto a normas nacionales e internacionales

| Parámetro | Unidad | Media efluente | Límite máximo permisible | Normativa | Cumple | No cumple |
|------------------|----------------|-------------------|--------------------------|-----------------------|--------|-----------|
| pH | Unidades de pH | 6.16 | 6-9 | NOM-001-SEMARNAT-2021 | x | |
| Temperatura | °C | 23.667 | 20-30 | Según cultivo | x | |
| DBO ₅ | mg/L | 60.787 | 200 | NTON 05 027-05 (2006) | x | |
| E. coli | NMP/100 mL | 1.6×10^4 | 1×10^4 | OMS (2006) | | x |

| Parámetro | Unidad | Media efluente | Límite máximo permisible | Normativa | Cumple | No cumple |
|------------------|--------|----------------|--------------------------|------------------------------|--------|-----------|
| CE | μS/cm | 511.467 | 4 (200mo) | NTON 05 027 -05 (2006) | x | |
| Ca | mg/L | 66.09 | N/E | Según cultivo | - | - |
| CO ₃ | mg/L | 0.2 | N/E | N.A. | - | - |
| HCO ₃ | mg/L | 3.2 | N/E | N.A. | - | - |
| Cl | mg/L | 36.773 | 4-10 | FAO (1985) | | x |
| Na | mg/L | 40.033 | 3-9 | | | x |
| N | mg/L | 32.253 | 15 | NTON 05 027 -05 (2006) | | x |
| P | mg/L | 1.967 | 5 | | x | |
| Mg | mg/L | 40.513 | N/E | Según cultivo | - | - |
| K | mg/L | 6.583 | N/E | | - | - |

Fuente: Elaboración propia

La evaluación del efluente se realizó con base en los límites establecidos por la Norma Técnica Obligatoria Nicaragüense NTON 05 027-05 (2006), la cual regula descarga de aguas residuales en el país en términos de parámetros fisicoquímicos críticos. Para aquellos parámetros no contemplados por la normativa nacional, se emplearon valores de referencia complementarios provenientes de NOM-001-SEMARNAT-2021, OMS (2006) y lineamientos agrícolas de FAO (1985).

Esta combinación permite evaluar el efluente no solo desde una perspectiva legal, sino también desde la salud pública y la aptitud para riego agrícola.

Los resultados obtenidos muestran un efluente con características aceptables en varios parámetros clave, pero con incumplimientos que requieren atención para su uso seguro.

3.2.2.4. Interpretación técnica de los parámetros frente a las normativas aplicables

La revisión comparativa de los parámetros obtenidos en los muestreos respecto a las normativas ambientales de referencia, con especial énfasis en la normativa nacional NTON 05 027-05 (2006), permitió identificar los parámetros que se encuentran dentro del rango permitido, aquellos que exceden los límites establecidos y los que no son regulados por normativa y por tanto se analizarán en el siguiente objetivo para su interpretación agronómica.

-Parámetros que cumplen con los límites normativos NTON 05 027-05 (2006)

DBO₅ (60.787 mg/L)

La concentración obtenida se encuentra ampliamente por debajo del límite máximo permitido de 200 mg/L.

Esto implica que el efluente presenta una carga de materia orgánica biodegradable moderada y cumple con la regulación nacional para descarga y reuso, indicando un nivel adecuado de depuración del agua residual.

Conductividad eléctrica — CE (0.51 dS/m / 511.47 µS/cm)

Si bien la NTON 05 027-05 (2006), no presenta el parámetro en unidades estándar internacionales, la interpretación operativa equivalente de 4 (200 µS/cm) es consistente con ~4 dS/m, lo cual sitúa el valor obtenido muy por debajo del límite operativo.

Esto evidencia baja presencia de sales solubles, cumplimiento frente al criterio aplicado, y ausencia de riesgo salino desde la perspectiva normativa nacional.

pH (6.16)

Aunque no se regula mediante la NTON 05 027-05 (2006), el valor se encuentra dentro de los límites establecidos por NOM-001-SEMARNAT-2021 (6–9), indicando un efluente químicamente estable y no corrosivo.

Este rango favorece tanto su manejo como su eventual uso en sistemas de riego sin afectar significativamente la disponibilidad de nutrientes.

Fósforo (1.967 mg/L)

Este parámetro se encuentra bajo el límite permitido por la normativa nacional (5mg/L). El cumplimiento indica que la presencia de fósforo en el efluente no representa riesgo significativo de enriquecimiento excesivo de nutrientes ni de eutrofización desde el enfoque regulatorio.

Temperatura (23.67 °C) — Dentro de los valores aceptables para el comportamiento del cultivo (20–30 °C)

Si bien la temperatura no está regulada por la NTON 05 027-05 (2006), se encuentra dentro del rango fisiológicamente aceptable para procesos agronómicos del tabaco, sin generar alteraciones térmicas significativas.

-Parámetros que NO cumplen con los límites normativos

Nitrógeno total (32.253 mg/L) — No cumple NTON 05 027-05 (≤ 15 mg/L)

Este es el incumplimiento más relevante desde la perspectiva legal.

El exceso de nitrógeno constituye un potencial riesgo ambiental para el cuerpo receptor y puede generar enriquecimiento de nutrientes y alteraciones en el equilibrio ecológico. En términos regulatorios, este resultado señala claramente la necesidad de tratamiento complementario para disminuir la carga nitrogenada si se pretende garantizar el cumplimiento estricto de la normativa nacional.

E. coli (1.6×10^4 NMP/100 mL) — No cumple OMS ($\leq 1 \times 10^4$)

Aunque la NTON no establece límites para E. coli, sí lo hace la OMS (2006), y el valor obtenido supera el umbral recomendado.

Esto indica una concentración microbiológica significativa que podría representar riesgos para la salud y requiere tratamiento adicional si se pretende aplicar el efluente para riego en cultivos de contacto directo o usos recreativos.

Parámetros sin límite normativo específico en la NTON 05 027-05

Estos parámetros no tienen restricción legal actual para descarga de efluentes según el marco regulatorio nacional; por tanto, no se interpretan en este objetivo desde un criterio legal, sino que se reservan para su análisis en el objetivo 3, bajo criterios de idoneidad agronómica: calcio, magnesio, potasio, carbonatos, bicarbonatos, cloruros y sodio.

Su interpretación no puede realizarse bajo el enfoque del cumplimiento/ no cumplimiento, ya que la normativa nacional no establece límites para ellos, sino que serán evaluados posteriormente según tolerancia del tabaco y comportamiento del suelo.

3.2.3. Conclusión del objetivo 2

En términos regulatorios, el efluente proveniente de la STAR cumple con la normativa nacional NTON 05 027-05 en los parámetros de mayor relevancia legal (DBO₅, fósforo y conductividad), lo cual constituye un elemento favorable para futuras consideraciones de manejo. Sin embargo, el incumplimiento observado en el contenido de nitrógeno total y la concentración de E. coli representa una alerta técnica que debe ser atendida mediante tratamiento adicional o medidas de control si se pretende su uso para riego agrícola dentro de un marco regulador.

Los parámetros sin regulación específica no pueden evaluarse bajo criterios legales y serán analizados posteriormente bajo criterios agronómicos de respuesta del cultivo de tabaco y comportamiento del suelo.

3.3. Evaluación de la idoneidad agronómica

La evaluación de la idoneidad agronómica del efluente constituye un paso esencial para determinar su potencial uso en el riego del cultivo de tabaco. Más allá del cumplimiento normativo y sanitario, es necesario analizar si las características fisicoquímicas del efluente se ajustan a los requerimientos nutricionales del cultivo y a las condiciones que permiten mantener la salud y productividad del suelo.

Para este propósito, los resultados obtenidos se contrastan con los criterios técnicos establecidos por la FAO (1985) para calidad de agua de riego, las directrices microbiológicas de la OMS (2006), y los valores típicos de fertilización empleados en la producción de tabaco. Esta comparación permite identificar tanto los aportes potenciales del efluente como sus limitaciones, proporcionando un marco integral para valorar su conveniencia como recurso hídrico alternativo.

3.3.1. Metodología

Basándonos en lo mencionado previamente, se procedió a analizar los criterios de calidad agronómica del efluente del STAR de Estelí.

-Peligro de salinización: Para evaluar el peligro de salinización se tomó como referencia los límites máximos permisibles establecidos por la FAO (1985). La conductividad eléctrica (CE) fue el parámetro principal para determinar el nivel de riesgo en los suelos de cultivo irrigados con el agua residual depurada, conforme a lo señalado por Bhattacharya et al., (2012).

-Peligro de alcalinidad: Para evaluar el peligro de alcalinidad se tuvo en cuenta la clasificación propuesta por la FAO (1985) que involucra la RAS° y la CE. El valor de Ca presente en el agua se ajustará para obtener el Ca° (Ver Anexos, Figura 36, pág. XXIV). Este valor resulta dependiente de la salinidad del agua de riego (CE) y la relación entre los bicarbonatos y el Ca presente en la misma. Luego, se calculó la relación de absorción del sodio (RAS°) utilizando la ecuación establecida por la FAO (1985):

Ecuación 7. Determinación de la relación de absorción del sodio (RAS°)

$$RAS^{\circ} = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca + Mg}{2}}}$$

Se evidenció gráficamente los resultados obtenidos de la RAS° vs. los valores de CE. Esta gráfica relaciona la salinidad (CE) con la RAS° para predecir el efecto sobre la infiltración en el suelo, indicando si esta resulta severa, moderada o sin reducción (Ver Anexos, Figura 37, pág. XXV). Posteriormente se determinó la RAS_{mod} empleando la fórmula de Villafañe (2011) presentada a continuación:

Ecuación 8. Determinación de la relación de absorción del sodio modificada (RAS_{mod})

$$RAS_{mod} = \frac{Na^{+}}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} - (CaCO_3 + 0.5 * Ca(HCO_3)_2) + Mg^{2+} - (MgCO_3 + 0.25 * Mg(HCO_3)_2)}{2}}}$$

Finalmente, se compararon los resultados de la RAS° y RAS_{mod} mediante una regresión lineal simple, utilizando el modelo $y = mx + b$, donde una de las variables actúa como dependiente y la otra como independiente. Esta relación permitió representar de forma gráfica y analítica el comportamiento del recurso hídrico una vez infiltrado en el suelo, y se evaluó su ajuste mediante el coeficiente de determinación R².

-Peligro de toxicidad: Se contemplaron las directrices propuestas por la FAO (1985), que delimitan ciertos intervalos para los iones más frecuentemente tóxicos, como son el Na, Cl y B, se tomaron en cuenta para la investigación solamente el cloruro y sodio, esto debido a que son los únicos presentes en la composición típica del agua residual domestica presentada en el libro de Metcalf y Eddy (1991).

-Riesgo microbiológico: Se emplearon los estándares definidos por OMS (2006), para evaluar el riesgo microbiológico. En este estudio, se valoraron en cuenta coliformes fecales más específicamente E-coli como principales

indicadores bacterianos en el agua residual depurada, debido a que la presencia de estos patógenos en el agua aumenta la preocupación por la salud y seguridad de los trabajadores agrícolas que están involucrados en actividades en contacto directo al agua y el cultivo.

-Contribución de nutrientes: Los resultados de las concentraciones de nitrógeno y fósforo se compararon con los límites establecidos en la NTON 05 027-05 (2006) para el reuso de aguas tratadas en riego agrícola categoría "C". Para potasio y magnesio, al no existir límites normativos, se utilizarán conversiones basadas en los valores típicos de fertilización para el cultivo del tabaco.

Se incorporaron dichos nutrientes debido a que el tabaco requiere nitrógeno como principal nutriente para el desarrollo, potasio para la calidad de las hojas y fósforo para un crecimiento saludable, así como el magnesio para incrementar la sanidad vegetal (Arauz, 2022).

3.3.2. Consideraciones agronómicas del reuso del efluente

3.3.2.1. Peligro de salinización

El valor promedio de conductividad eléctrica obtenido en el efluente fue de 0.51 dS/m, lo cual constituye un indicador directo de la concentración total de sales solubles presentes en el agua de riego.

Cabe señalar que los valores guía de la FAO (1985) utilizados como referencia ya se encuentran incorporados en los anexos del documento (Ver Anexos, Tabla 22, pág. VII). No obstante, para facilitar la comprensión e interpretación inmediata de los resultados del presente estudio, se presenta a continuación una síntesis aplicada de dichos valores comparados con el efluente analizado.

Tabla 11. Clasificación de la salinidad del efluente según criterios agronómicos FAO

| CE (dS/m) | Clasificación agronómica | Implicaciones en suelo y cultivo |
|-----------|--------------------------|---|
| ≤0.7 | Sin restricción de uso | No afecta absorción de agua ni balance osmótico |
| 0.7–3 | Restricción moderada | Posible acumulación gradual de sales |
| ≥3 | Restricción severa | Riesgo de estrés hídrico y reducción de rendimiento |

Fuente: FAO (1985)

De acuerdo con esta clasificación, el efluente analizado se ubica en la categoría de:

-Agua sin restricción de uso para riego en términos de salinidad (≤0.7 dS/m).

En términos agronómicos, este valor refleja que:

- La presión osmótica del agua es baja, permitiendo que el tabaco absorba agua sin requerir gasto energético adicional para superar gradientes salinos.
- No se induce estrés osmótico radicular, lo que favorece el crecimiento vegetativo.
- La actividad microbiana edáfica se mantiene estable, evitando inhibición por salinidad.
- El potencial de intercambio catiónico del suelo no se ve afectado por saturación de sales.
- No se espera acumulación significativa de sales en la rizosfera aún bajo riego repetido.

- No se requieren medidas de manejo como lavado de sales, enmiendas químicas o sistemas de drenaje adicionales.
- Desde una perspectiva de manejo agronómico, la utilización continua de este efluente como fuente hídrica no comprometería las condiciones geoquímicas del suelo y es compatible con su uso prolongado para el cultivo de tabaco en su etapa productiva.

Es importante resaltar que: La baja salinidad del efluente es consistente con el comportamiento de aguas con predominancia de bicarbonatos y baja concentración total de sales, condición que generalmente favorece el intercambio iónico y disponibilidad de nutrientes.

3.3.2.2. Peligro de alcalinidad

Para la aplicación de la metodología FAO (1985) en el análisis de alcalinidad y sodicidad, fue necesario convertir los valores de concentración de bicarbonato (HCO_3^-), calcio (Ca^{2+}) y conductividad eléctrica (CE) a unidades químicas estandarizadas para criterios de riego.

Originalmente, los valores analíticos de laboratorio fueron reportados en mg/L, sin embargo, para su uso en las ecuaciones de RAS° y RASmod, estos deben expresarse en miliequivalentes por litro (meq/L). La conversión se realizó utilizando la relación:

$$\text{meq/l} = \frac{\text{mg/l}}{\text{Peso equivalente}}$$

Donde:

El peso equivalente del Ca^{2+} = 20.04 mg/meq

El peso equivalente del HCO_3^- = 61 mg/meq

La CE fue convertida a dS/m dividiendo los $\mu\text{S/cm}$ entre 1000

Ejemplo de conversión real aplicada:

Ca^{2+} = 63.73 mg/L \rightarrow 63.73 / 20.04 = 3.18 meq/L

$$\text{HCO}_3^- = 3.14 \text{ mg/L} \rightarrow 3.14 / 61 = 0.0515 \text{ meq/L}$$

$$\text{CE} = 511.47 \text{ } \mu\text{S/cm} \rightarrow 511.47 / 1000 = 0.511 \text{ dS/m}$$

Una vez convertidos los valores de calcio, magnesio, bicarbonato y conductividad eléctrica a unidades de meq/L, se procedió a obtener el valor de calcio corregido (Ca°), requerido para el cálculo de la RAS° . Este valor se obtiene aplicando el criterio propuesto por la FAO (Ayers & Westcot, 1985), el cual establece que el calcio efectivamente disponible en la solución del suelo depende de la relación entre la conductividad eléctrica del agua (CEw) y la proporción de bicarbonato respecto al calcio presente.

El procedimiento consiste en interpolar o localizar el valor correspondiente en la tabla FAO (1985), donde se presentan los valores de calcio ajustado para diferentes combinaciones de CEw y HCO_3/Ca . De esta forma, el calcio corregido refleja la fracción que permanece en solución después de considerar la posible precipitación de carbonatos, siendo este ajuste fundamental para representar adecuadamente el comportamiento químico del agua una vez infiltrada en el suelo.

Tabla 12. Resultados de los valores de calcio corregido para agua de riego

| Parámetro | Resultados de Ca corregido | | |
|------------------------------------|----------------------------|--------|---------|
| | 1 | 2 | 3 |
| CEw (dS/m) | 0.4940 | 0.5120 | 0.5280 |
| HCO₃ (meq/l) | 0.0515 | 0.0566 | 0.0493 |
| Ca (meq/l) | 3.1800 | 3.2900 | 3.4100 |
| HCO₃ /Ca (meq/l) | 0.0162 | 0.0172 | 0.0145 |
| Ca^o (meq/l) | 14.400 | 14.400 | 14.4000 |

Fuente: Elaboración propia

Para calcular la Relación de Absorción de Sodio (RAS°) se requiere contar, previamente, con los valores de sodio (Na^+), calcio corregido (Ca°) y magnesio (Mg^{2+}) expresados en meq/L, ya que la ecuación propuesta por la FAO (1985) trabaja en estas unidades.

Tabla 13. Valores de Na⁺, Mg²⁺, Ca^o y RAS^o para cada muestreo

| Muestreo | Na ⁺ (meq/L) | Mg ²⁺ (meq/L) | Ca ^o (meq/L) | RAS ^o |
|----------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|------------------|
| 1 | 1.641 | 3.178 | 14.400 | 0.553 |
| 2 | 1.750 | 3.302 | 14.400 | 0.588 |
| 3 | 1.830 | 3.524 | 14.400 | 0.611 |

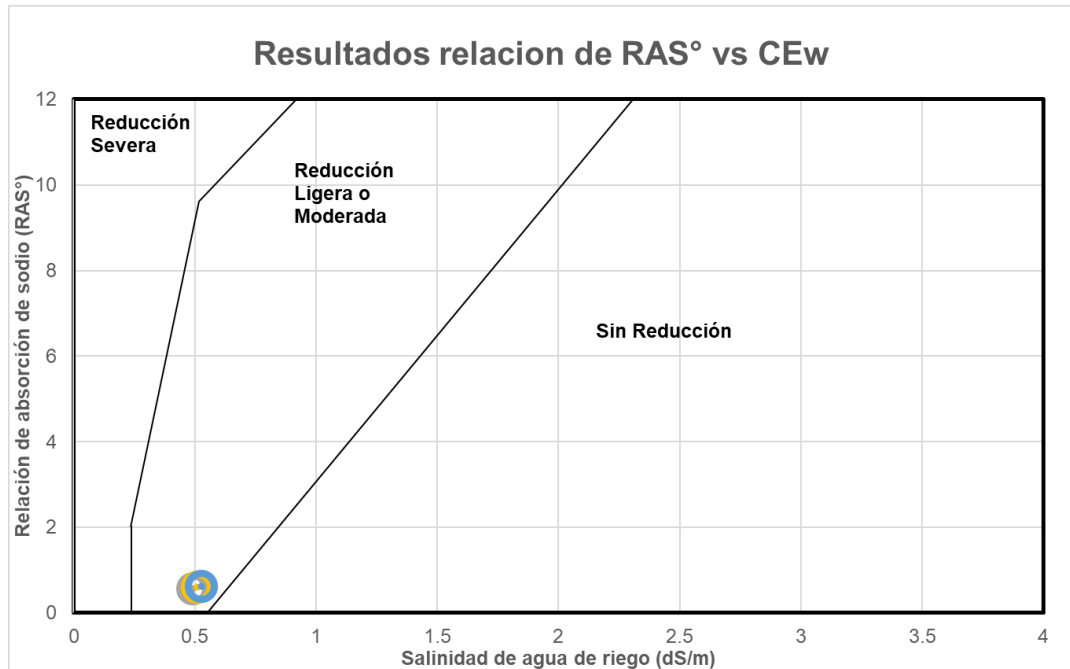
Fuente: Elaboración propia

Como ejemplo representativo, se muestra a continuación la manera en que se obtuvo el valor de RAS^o correspondiente al Muestreo 1. Para ello, se sustituyeron los valores convertidos a meq/L en la ecuación presentada previamente:

$$\text{RAS}^{\circ} = \frac{\text{Na}}{\sqrt{\frac{\text{Ca}^{\circ} + \text{Mg}}{2}}} = \frac{1.641}{\sqrt{\frac{14.400 + 3.178}{2}}} = \frac{1.641}{\sqrt{8.789}} = \frac{1.641}{2.964} = 0.553$$

Los valores de RAS^o calculados para las tres muestras presentan niveles muy bajos (0.553 – 0.611), lo que indica una baja presencia relativa de sodio en comparación con calcio y magnesio en el agua analizada. Este comportamiento sugiere que el agua presenta un riesgo mínimo de afectar la estructura del suelo por sodificación y, en consecuencia, no se prevén efectos negativos significativos en la tasa de infiltración. Esta tendencia será posteriormente evidenciada gráficamente en la relación entre RAS^o y CE_w, donde se observará la ubicación de las muestras dentro de la zona correspondiente a “Reducción ligera o moderada en la infiltración”.

Tabla 14. Resultados obtenidos de la RAS° vs CEw



Fuente: Elaboración propia

La gráfica de la relación RAS° vs CEw evidencia que, para condiciones de salinidad del agua de riego y niveles de sodio adsorbido bajos, el suelo no presenta reducción en la infiltración preocupante, permitiendo un movimiento normal del agua. Conforme la salinidad del agua y el RAS° aumentan, la tendencia se desplaza hacia las zonas de reducción ligera y posteriormente a reducción severa en la infiltración, lo que indica un mayor riesgo de compactación del suelo y disminución de la permeabilidad. Esto resalta la importancia de monitorear y controlar tanto la salinidad como el contenido de sodio del agua empleada para riego, con el objetivo de mantener condiciones hidráulicas favorables en el suelo y evitar impactos negativos en la eficiencia del riego y el desarrollo del cultivo.

En la Tabla 15 se muestran los resultados obtenidos para la RAS_{mod} propuesto por Villafañe (2011).

Tabla 15. Resultados de la RAS_{mod} para determinar el peligro de sodicidad en el agua de riego

| Parámetro | Muestreo | | |
|-------------|----------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 |
| RAS_{mod} | 0.922 | 0.965 | 0.984 |

Fuente: Elaboración propia

De igual forma, para la determinación de la RAS_{mod} se emplearon los valores de sodio, calcio y magnesio convertidos previamente a unidades de meq/L, sustituyéndolos directamente en la ecuación correspondiente según Villafañe (2011). Este índice incorpora la influencia conjunta de los cationes principales presentes en el agua sin aplicar ajustes adicionales, permitiendo contrastar su comportamiento con el valor obtenido mediante la RAS° . A continuación, se muestra el cálculo representativo para el muestreo 1:

$$RAS_{mod} = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} - (CaCO_3 + 0.5 \cdot Ca(HCO_3)_2) + Mg^{2+} - (MgCO_3 + 0.25 \cdot Mg(HCO_3)_2)}{2}}}$$

Supuestos aplicados $CO_3^{2-} \approx 0$ (reportado < 0.40 mg/L) y el bicarbonato total se reparte equivalentemente.

$$Ca(HCO_3)_2 = \frac{HCO_3}{2} = \frac{0.0515}{2} = 0.0258 \text{ meq/L}$$

$$Mg(HCO_3)_2 = \frac{HCO_3}{2} = 0.0258 \text{ meq/L}$$

Correcciones:

$$Ca' = Ca^{2+} - (CaCO_3 + 0.5 \cdot Ca(HCO_3)_2) = 3.180 - (0 + 0,5 \cdot 0.0258) = 3.180 - 0.0129 = 3.167 \text{ meq/L}$$

$$Mg' = Mg^{2+} - (MgCO_3 + 0.25 \cdot Mg(HCO_3)_2) = 3.178 - (0 + 0,25 \cdot 0.0258) = 3.178 - 0.00645 = 3.172 \text{ meq/L}$$

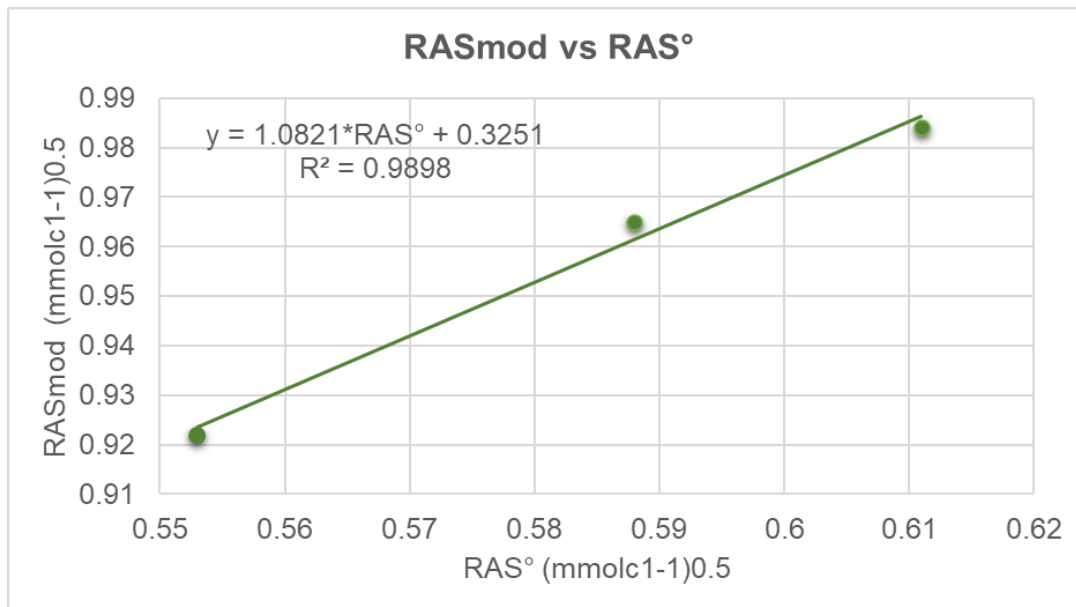
Denominador y RAS_{mod} :

$$Den = \sqrt{\frac{Ca' + Mg'}{2}} = \sqrt{\frac{3.167 + 3.172}{2}} = \sqrt{3.169} = 1.780$$

$$RAS_{mod} = \frac{Na^+}{Den} = \frac{1.641}{1.780} = 0.92$$

La RAS° y la RAS_{mod} expresan el comportamiento de la Relación de Absorción de Sodio en el agua de riego después de su interacción con el suelo (Villafañe, 2011). Con el propósito de verificar la variabilidad entre los valores obtenidos, se aplicó un análisis de regresión lineal simple, incorporando su ecuación de ajuste correspondiente y el coeficiente de determinación (R^2) como indicador de la precisión del modelo.

Figura 14. Regresión de la RAS° vs RAS_{mod}



Fuente: Elaboración propia

El diagrama de dispersión entre RAS° y RAS_{mod} muestra un ajuste lineal muy fuerte ($R^2 = 0.9898$), evidenciando una estrecha relación entre ambos parámetros y confirmando lo expuesto por Villafañe (2011) respecto a la coherencia de ambas metodologías en la estimación del riesgo de sodicidad. No obstante, al considerar

que la RAS_{mod} integra la corrección por magnesio, mientras que la RAS° no contempla dicho ion, resulta más apropiado utilizar la RAS modificada para la interpretación final cuando se dispone de información sobre la composición iónica del agua (Villafañe, 2011).

En este caso, aunque se aplicó la RAS_{mod} , se observa que los valores de magnesio presentes en el agua no producen una variación sustancial que modifique la clasificación de sodicidad del suelo, manteniendo la tendencia hacia niveles bajos de riesgo. Estos hallazgos respaldan la pertinencia del uso de la RAS_{mod} como un indicador más robusto y químicamente representativo en la evaluación de la calidad del agua para riego y su interacción con el suelo.

Desde la perspectiva agronómica, los valores bajos de RAS_{mod} obtenidos implican que el agua analizada no favorecería procesos de sodificación en el suelo, permitiendo mantener una buena infiltración y aireación en la zona radicular del cultivo de tabaco. Esto resulta especialmente relevante porque el tabaco es exigente en suelos bien estructurados, con adecuada permeabilidad y buena disponibilidad de calcio y magnesio para sostener procesos fisiológicos asociados a la calidad de la hoja. La ausencia de efectos adversos por sodio contribuye a la preservación de la estructura del suelo, evitando la dispersión de arcillas y asegurando una adecuada absorción de nutrientes, lo cual favorece el desarrollo equilibrado de la planta y la producción de hojas con mejores características para su uso industrial.

3.3.2.3. Peligro de toxicidad

La toxicidad del agua de riego puede generar alteraciones metabólicas en las plantas, manifestándose principalmente en la reducción del crecimiento y en desequilibrios en la absorción de nutrientes esenciales. La presencia de sales, particularmente cloruro de sodio (NaCl), incrementa las concentraciones de sodio y cloruros en los tejidos vegetales y puede provocar una disminución del potasio en hojas y raíces, afectando procesos fisiológicos claves como la fotosíntesis y el desarrollo vegetativo (Maggio et al., 2007 citado por Gandonou et al., 2011).

De acuerdo con los lineamientos establecidos por la FAO (1985), el efluente evaluado para su posible reuso en riego agrícola no generaría afectaciones metabólicas significativas en el cultivo de tabaco. Los valores promedio obtenidos para sodio y cloruros fueron de 40.033 mg/L y 36.773 mg/L, equivalentes aproximadamente a 1.74 meq/L de Na⁺ y 1.04 meq/L de Cl⁻, respectivamente. Al compararse con los rangos de restricción definidos para riego por aspersión, dichos valores se encuentran por debajo del umbral de 3 meq/L, correspondiente a la categoría de sin restricción de uso, indicando una baja probabilidad de toxicidad por estos iones.

En el caso del sodio, las concentraciones registradas se mantienen dentro de rangos aceptables, por lo que no se espera interferencia en la absorción de potasio ni alteraciones nutricionales que comprometan el desarrollo del cultivo. De manera similar, los valores de cloruro se sitúan muy por debajo de los límites a partir de los cuales este ion tiende a acumularse en el follaje y generar clorosis, fenómeno que afecta directamente la eficiencia fotosintética (Ayers y Westcot, 1987 citado por Pérez et al., 2019). La FAO (1985) señala que concentraciones superiores a 4 meq/L de cloruro implican restricciones moderadas y que valores por encima de 10 meq/L desaconsejan su uso para riego; no obstante, los resultados obtenidos en esta investigación se ubican ampliamente dentro del rango seguro.

En consecuencia, desde el punto de vista agronómico, el efluente analizado no representa un riesgo de toxicidad por sodio ni cloruros cuando se aplica mediante riego por aspersión, favoreciendo condiciones adecuadas para el crecimiento del tabaco, la conservación del equilibrio nutricional y la obtención de hojas con características apropiadas para su aprovechamiento productivo.

3.3.2.4. Riesgo microbiológico

El riesgo microbiológico del efluente fue evaluado a partir de la concentración de *Escherichia coli* (*E. coli*), utilizada como indicador de contaminación fecal y de la presencia potencial de patógenos entéricos. De acuerdo con los lineamientos establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS), el valor máximo

recomendado para el riego agrícola es de $\leq 10^4$ NMP/100 mL, expresado como promedio aritmético (OMS, 2006).

Los resultados obtenidos mostraron que la concentración promedio de E. coli en el efluente fue de 1.6×10^4 NMP/100 mL, valor que supera el límite recomendado por la OMS, por lo que el efluente no cumple con los criterios microbiológicos establecidos para el reuso directo en agricultura. En consecuencia, se identifica un riesgo potencial para la salud pública, especialmente para los trabajadores agrícolas y otras personas que puedan tener contacto directo o indirecto con el agua de riego.

La presencia de E. coli en concentraciones elevadas puede asociarse a efectos adversos en la salud humana, incluyendo infecciones gastrointestinales, afecciones cutáneas y enfermedades transmitidas por alimentos, particularmente cuando se emplean sistemas de riego por aspersión que favorecen la dispersión de microorganismos y el contacto con la parte aérea del cultivo (OMS, 2006). Asimismo, desde el punto de vista agrícola, la contaminación microbiológica puede afectar la inocuidad del producto cosechado y limitar su aceptación comercial.

Los resultados obtenidos evidencian que el sistema de tratamiento actual de la planta no garantiza una remoción suficiente de microorganismos patógenos, por lo que el efluente presenta restricciones para su uso en riego agrícola sin la aplicación de medidas adicionales de control. En este sentido, se hace necesario considerar la implementación de tratamientos complementarios o barreras de protección, tales como procesos de desinfección, mejoras en la operación del sistema o restricciones en el tipo de cultivo y método de riego, con el fin de reducir el riesgo microbiológico y cumplir con los estándares internacionales recomendados para el reuso seguro del agua residual en agricultura (OMS, 2006).

3.3.2.5. Contribución de nutrientes

Los resultados promedio obtenidos para nitrógeno, fósforo, potasio y magnesio en el efluente fueron evaluados considerando tanto los límites establecidos por la NTON 05 027-05 (2006) para el reuso de aguas en riego agrícola categoría "C",

como su correspondencia agronómica respecto a las necesidades nutricionales del cultivo del tabaco.

En cuanto a los parámetros regulados por la normativa, el nitrógeno total alcanzó un valor promedio de 32.253 mg/L, superando ligeramente el límite de 30 mg/L, mientras que el fósforo, con 1.967 mg/L, se mantuvo dentro del máximo permitido de 2 mg/L. Esta diferencia marginal en nitrógeno no representa una restricción significativa para su aplicación agrícola, pero sí requiere considerarse en la planificación de la fertilización del cultivo para evitar aportes excesivos.

Con el fin de establecer la relevancia agronómica de estos resultados, los requerimientos de fertilización típicos del tabaco —expresados usualmente como kg/ha— fueron convertidos a concentraciones equivalentes en mg/L empleando una lámina anual de riego de 500 mm (aproximación $1 \text{ kg/ha} \approx 0.2 \text{ mg/L}$). Bajo esta conversión, las necesidades promedio se sitúan en rangos aproximados de 10–16 mg/L para nitrógeno, 2.62–4.36 mg/L para fósforo, 19.9–29.9 mg/L para potasio y 4–8 mg/L para magnesio. Al comparar estos valores con las concentraciones presentes en el efluente —32.253 mg/L de N, 1.967 mg/L de P, 6.583 mg/L de K y 40.513 mg/L de Mg— se evidencia que el efluente aporta cantidades muy superiores a las habituales para nitrógeno y magnesio, mientras que resulta deficiente en fósforo y potasio.

Desde el enfoque agronómico, estos resultados implican que el efluente posee un valor fertilizante significativo, especialmente por su aporte de nitrógeno y magnesio, lo cual podría reducir los costos asociados a la fertilización comercial y mejorar la disponibilidad de estos nutrientes en etapas clave del desarrollo del cultivo. No obstante, las bajas concentraciones de fósforo y potasio evidencian la necesidad de complementar dichos nutrientes mediante fertilización tradicional, debido a su papel determinante en la formación de tejidos, el desarrollo radicular y la calidad de la hoja de tabaco.

Asimismo, el aporte elevado de magnesio podría modificar la relación entre cationes del suelo (Ca–Mg–K), por lo que se recomienda monitorear la saturación de bases para evitar desbalances nutricionales, especialmente en suelos con baja

capacidad de intercambio catiónico. Es decir, el efluente puede considerarse un insumo con potencial agronómico, siempre que su aplicación se maneje bajo un esquema de fertilización integrada que compense las deficiencias en P y K y que vigile la estabilidad nutrimental del suelo.

3.3.3. Conclusión del objetivo 3

A partir del análisis integral de la calidad agronómica del efluente, se concluye que, desde el punto de vista de salinidad, sodicidad y toxicidad específica de iones, el agua evaluada presenta condiciones favorables para su uso en riego agrícola. Los valores de conductividad eléctrica ubicaron al efluente dentro de un rango de salinidad baja a moderada, lo que no representa un riesgo significativo para el desarrollo del cultivo ni para la acumulación de sales en el suelo bajo un manejo adecuado del riego. De igual forma, los índices RAS° y RAS_{mod} reflejaron un riesgo bajo de sodificación, indicando que el uso del efluente no comprometería la estructura del suelo ni la tasa de infiltración, aspecto fundamental para mantener una adecuada aireación y disponibilidad de agua en la zona radicular.

En cuanto a la toxicidad iónica, las concentraciones de sodio y cloruros se encontraron por debajo de los límites establecidos por la FAO (1985) para riego por aspersión, lo que sugiere que el efluente no generaría perturbaciones metabólicas en el cultivo de tabaco ni interferencias en la absorción de nutrientes esenciales como el potasio. Desde el enfoque nutricional, el contenido de macroelementos presentes en el efluente aporta beneficios agronómicos complementarios, sin evidenciar concentraciones que resulten fitotóxicas o limitantes para el crecimiento vegetal.

El análisis microbiológico evidenció que la concentración promedio de *Escherichia coli* supera el valor máximo recomendado por la Organización Mundial de la Salud para el riego agrícola, lo que constituye la principal limitante para el uso directo del efluente. Esta condición implica un riesgo sanitario potencial, especialmente para los trabajadores agrícolas y para cultivos de manejo manual, por lo que el efluente no puede considerarse plenamente apto sin la implementación de medidas adicionales de desinfección o manejo.

3.4. Estimación de la viabilidad comercial del reuso del efluente en la agricultura

El aprovechamiento del efluente proveniente de la STAR del municipio de Estelí no solo representa una alternativa técnica de reutilización del recurso hídrico, sino también una oportunidad potencial de incorporación económica dentro del sector agrícola local. Evaluar su viabilidad comercial permite identificar en qué medida los productores de tabaco estarían dispuestos a adoptar el uso del agua residual depurada como insumo complementario en sus sistemas de riego.

En el presente estudio, la estimación de la viabilidad comercial se orienta a identificar la aceptación del efluente de la STAR de Estelí como alternativa de riego para el cultivo de tabaco, tomando en cuenta las condiciones socioeconómicas, productivas y de gestión del recurso en la zona de influencia.

Para ello, se aplicó una metodología basada en la valoración contingente, que permite cuantificar la disposición a pagar (DAP) de los agricultores por la concesión del uso del agua residual depurada, así como analizar los factores que inciden en su decisión de adopción. Este enfoque posibilita valorar el potencial de incorporación del reuso dentro del sistema productivo local, sentando las bases para su implementación comercial bajo criterios de sostenibilidad y eficiencia hídrica.

3.4.1. Metodología

Para evaluar la viabilidad comercial del reuso del efluente de la STAR de Estelí para riego de cultivos de tabaco, se gestionó la colaboración con la Cámara Nicaragüense de Tabacaleros en Estelí. El director autorizó el desarrollo del estudio con los miembros de la asociación local, ubicados cerca de la descarga del efluente. Se diseñaron ocho preguntas, combinando opciones cerradas y abiertas, para obtener información sobre el potencial de comercialización.

La recolección de datos se realizó mediante una encuesta virtual diseñada en Google Forms, que permitió la participación de múltiples usuarios y admite preguntas ilimitadas. El cuestionario fue estructurado de forma clara y concisa, abordando la disposición de los agricultores al uso del efluente, beneficios

percibidos y preocupaciones. El encabezado incluyó una breve descripción sobre los beneficios del reuso y el objetivo del estudio.

La encuesta fue distribuida digitalmente a los agricultores, mediante correo electrónico o los medios más apropiados, considerando las limitaciones de tiempo y disponibilidad de los agricultores, quienes a menudo enfrentan agendas laborales ajustadas. Se les proporcionó un enlace de acceso en el que pudieron acceder al contenido de la encuesta (Ver Anexo, pág. I).

La información recolectada mediante el cuestionario virtual fue consolidada en Microsoft Excel para su organización y evaluación. Se procedió al análisis individual de los datos empleando tablas y gráficos que faciliten su interpretación.

Con base en la concesión por uso de agua que los tabacaleros pagan ante ANA, se realizó un análisis comparativo con la disponibilidad a pagar (DAP) consolidada por cada uno de los encuestados a fin de evaluar la congruencia entre sus expectativas de pago y los costos actuales. Por consiguiente, se tuvo en cuenta la Tabla 16 donde se consolidan los valores de interés para esta ocasión.

Tabla 16. Tabla de costos de concesión para aprovechamiento de agua

| Período | Descripción | Agua subterránea (Por pozo existente) | Agua superficial |
|---------|---|--|------------------|
| | | Costo en C\$ | |
| 5 años | Por emisión de título de concesión para aprovechamientos de agua, licencias especiales y permisos de vertidos | 3,662.95 | 3,662.95 |

Fuente: ANA, (2022)

Asimismo, se realizó un análisis estadístico descriptivo para interpretar la dispersión de los datos y obtener un valor monetario representativo de la DAP.

3.4.2. Resultados de las encuestas

Tabla 17. Caracterización de los actores involucrados en la estimación de la viabilidad comercial del reuso del efluente tratado

| Actores sociales | Número telefónico | Rol |
|---|--------------------------|--|
| IMTASA – Byron Rodríguez | 8359-0037 | Empresa tabacalera ubicada entre 1 y 5 km de la STAR. Usuario potencial del agua residual depurada. |
| Finca San Ramón – José Molina | 7652-5118 | Productor agrícola con plantación situada entre 1 y 5 km de la STAR. Usuario potencial del agua residual depurada. |
| TADONIC S.A. – Wilfredo Moncada | 8491-3226 | Empresa tabacalera de producción intensiva ubicada a menos de 1 km de la STAR. Usuario potencial del agua residual depurada. |
| Finca Plascencia – Zulema Ortega | 8612-4210 | Unidad agrícola ubicada entre 1 y 5 km de la STAR. Usuario potencial del agua residual depurada. |

Fuente: Elaboración propia, a partir de las encuestas aplicadas a productores de tabaco del municipio de Estelí, (2025).

La recolección de información de forma virtual representó un proceso que demandó seguimiento y constancia; por ello, se realizaron recordatorios periódicos a los correos electrónicos de los productores con el fin de asegurar su participación. Tras la aplicación del instrumento durante los meses de septiembre y octubre, se obtuvieron ocho respuestas válidas de los posibles participantes. Los resultados de este levantamiento se presentan de manera resumida en la Tabla 18, y su análisis detallado se expone posteriormente a través de representaciones gráficas

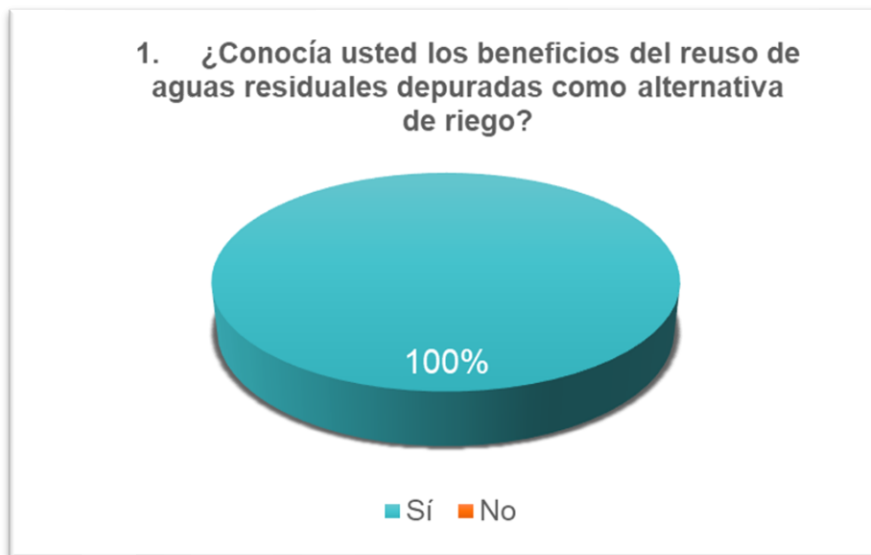
Tabla 18. Resumen consolidado de respuestas

| INDIVIDUO | TOTAL DE PREGUNTAS | | | | | | | |
|-----------|--------------------|--------|------|----|--|--|-----------|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| A | Sí | Estelí | 1mz | Sí | Aportes de nutrientes | Sí, le parece una opción más conveniente | No indicó | Sí |
| B | Sí | Estelí | 10mz | Sí | No aplica | Sí, le parece una opción más conveniente | C\$5,000 | Sí |
| C | Sí | Estelí | 14mz | Sí | Aportes de materia orgánica, reducir uso de agua dulce | Tal vez, dependiendo de las condiciones | C\$10,000 | Sí |
| D | Sí | Estelí | 6mz | Sí | Aportes de nutrientes, reducir uso de agua dulce | Tal vez, dependiendo de las condiciones | C\$3,800 | Sí |

Fuente: Elaboración propia, a partir de las encuestas aplicadas a productores de tabaco del municipio de Estelí, (2025).

3.4.2.1. Conocimiento en los beneficios del reuso

Figura 15. Conocimiento del reuso



Fuente: Elaboración propia, a partir de las encuestas aplicadas a productores de tabaco del municipio de Estelí, (2025).

De los cuatro productores encuestados, el 100 % manifestó tener conocimiento sobre los beneficios del reuso de aguas residuales depuradas como alternativa de riego, tal como se muestra en la Figura correspondiente. Este resultado evidencia que el concepto de reuso del agua depurada no resulta ajeno para los productores tabacaleros, quienes reconocen, al menos de forma general, las ventajas que puede representar en la actividad agrícola. Lo anterior refleja una percepción favorable y un nivel básico de sensibilización respecto al aprovechamiento de fuentes no convencionales de agua, en concordancia con las tendencias actuales de sostenibilidad y gestión eficiente del recurso hídrico en el sector productivo.

3.4.2.2. Localización de predios

En la Tabla 19 se presenta la localización de los productores agrícolas encuestados, de acuerdo con el municipio en el que se sitúan sus predios de producción.

Tabla 19. Propietarios agrícolas por municipio

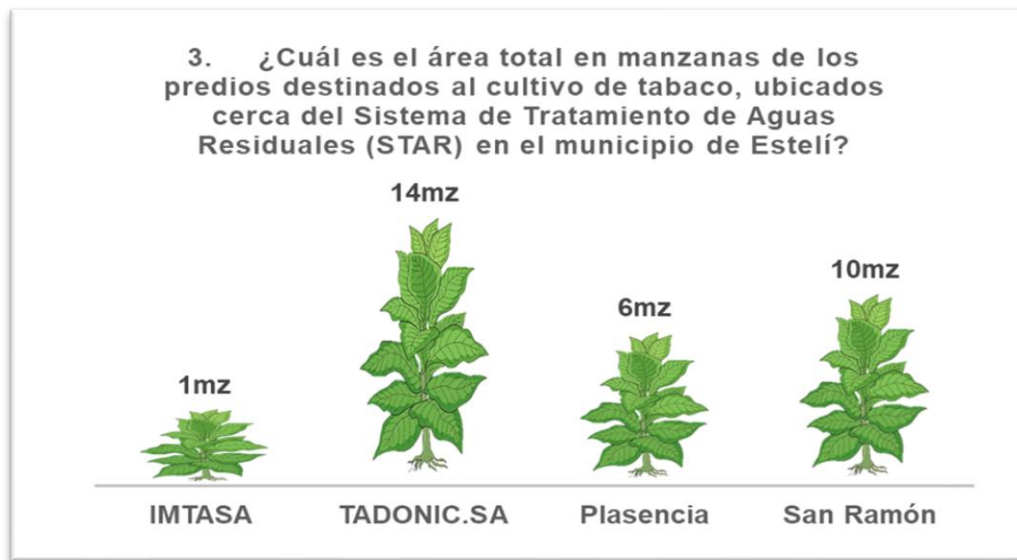
| Propietarios agrícolas | Municipio |
|------------------------|-----------|
| 1 | Estelí |
| 2 | Estelí |
| 3 | Estelí |
| 4 | Estelí |

Fuente: Elaboración propia, a partir de las encuestas aplicadas a productores de tabaco del municipio de Estelí, (2025).

A partir de la información obtenida, se observa que los cuatro productores encuestados poseen sus predios agrícolas dentro del municipio de Estelí. Este resultado confirma que todos los participantes desarrollan sus actividades productivas en una misma zona geográfica, lo que facilita la aplicación práctica de la propuesta de reuso del efluente de la STAR. La inclusión de esta pregunta tuvo como propósito identificar si alguno de los productores contaba con propiedades en otros municipios, con el fin de valorar la posibilidad de ampliar la aplicabilidad del proyecto a diferentes territorios. No obstante, al concentrarse todos los casos en Estelí, se reafirma el carácter focalizado de la propuesta y su pertinencia dentro del contexto productivo local del cultivo de tabaco.

3.4.2.3. Área total de los predios

Figura 16. Área total de los predios



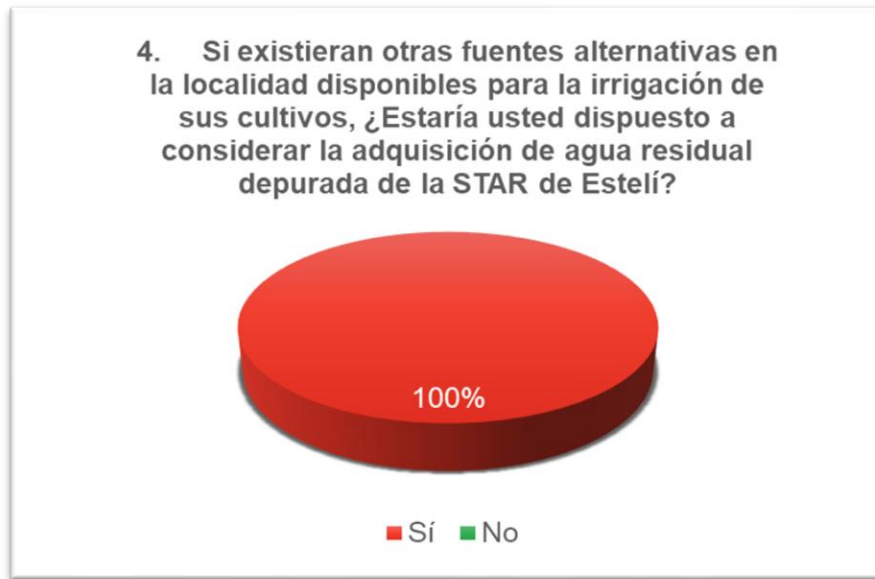
Fuente: Elaboración propia, a partir de las encuestas aplicadas a productores de tabaco del municipio de Estelí, (2025).

La Figura 16 presenta la distribución del área total en manzanas correspondiente a los predios destinados al cultivo de tabaco por parte de los productores ubicados en las cercanías del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales (STAR) de Estelí. Se observa que TADONIC S.A. concentra la mayor superficie con 14 manzanas, equivalente al 46,7 % del total registrado. Le siguen San Ramón con 10 manzanas (33,3 %), Plasencia con 6 manzanas (20,0 %) y, finalmente, IMTASA, con una extensión de 1 manzana (3,3 %).

Se observó a partir de los resultados que existe una distribución desigual de las áreas de cultivo, donde predomina la participación de unidades productivas medianas frente a una menor representación de pequeños productores. Esta composición sugiere una estructura productiva diversificada, favorable para analizar diferentes escenarios de aplicación del reuso del efluente, considerando tanto su factibilidad técnica como su adaptación a escalas de producción distintas.

3.4.2.4. Interés en el reuso

Figura 17. Interés en el reuso agrícola

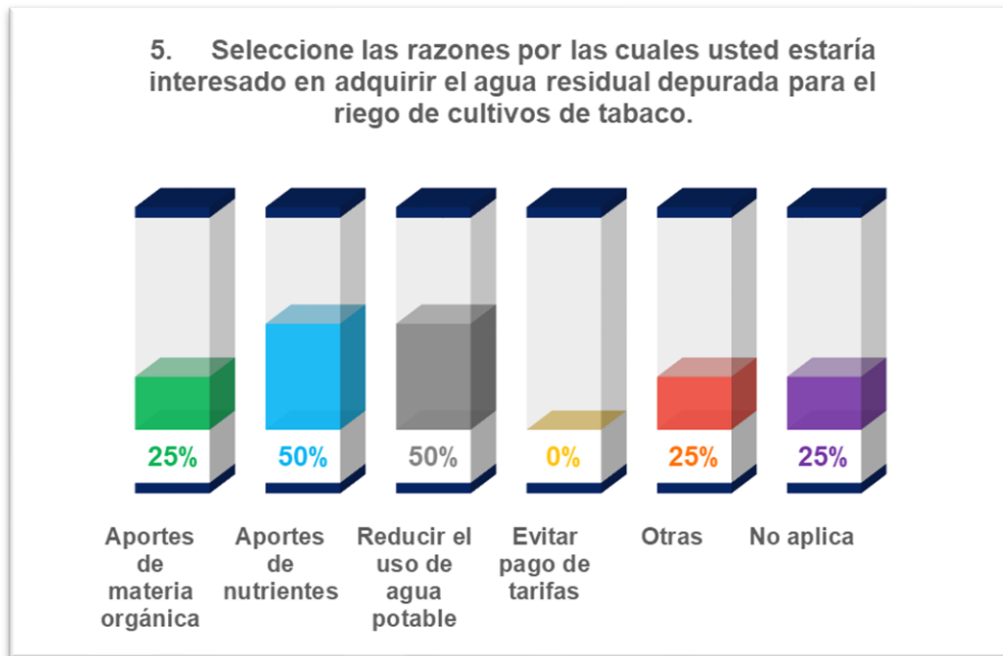


Fuente: Elaboración propia, a partir de las encuestas aplicadas a productores de tabaco del municipio de Estelí, (2025).

La Figura 17 evidencia una aceptación unánime por parte de los productores encuestados respecto a la adquisición de agua residual depurada para riego agrícola. El 100 % manifestó su disposición a considerar esta alternativa hídrica, lo que refleja una percepción favorable hacia el aprovechamiento del efluente de la STAR como fuente complementaria de riego. Este resultado sugiere un alto nivel de apertura y receptividad ante opciones sostenibles de manejo del recurso agua, especialmente en contextos donde la disponibilidad de fuentes convencionales puede verse limitada. La respuesta uniforme también indica que los productores reconocen el potencial agronómico y económico del reuso planificado, lo cual constituye un punto de partida clave para su futura implementación y aceptación comercial.

3.4.2.5. Razones para la adquisición de agua residual depurada

Figura 18. Razones para la adquisición de agua residual depurada



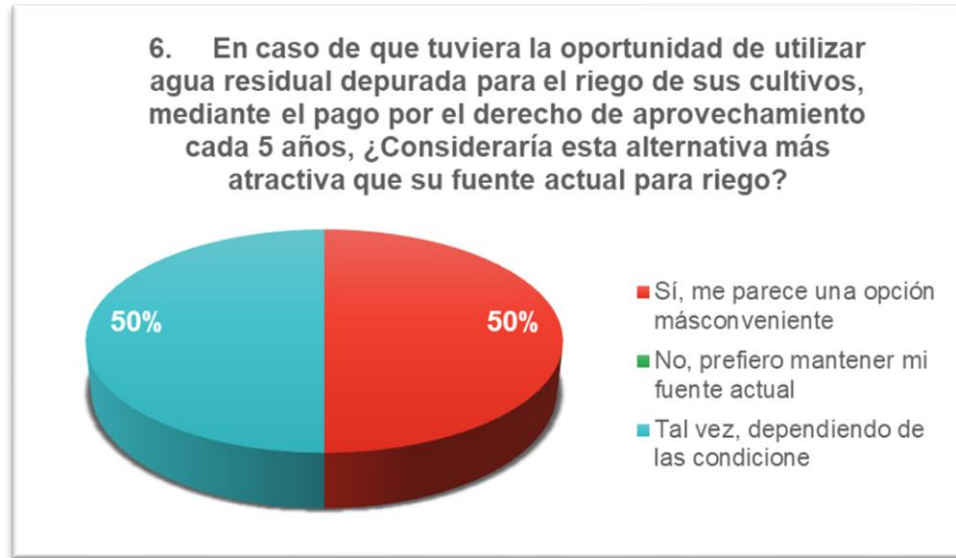
Fuente: Elaboración propia, a partir de las encuestas aplicadas a productores de tabaco del municipio de Estelí, (2025).

La Figura 18 muestra las principales razones expresadas por los productores agrícolas para considerar la adquisición de agua residual depurada destinada al riego de cultivos de tabaco. Los resultados evidencian que el 50 % de los encuestados señaló como motivos predominantes los aportes de nutrientes y la posibilidad de reducir el uso de agua potable, mientras que un 25 % destacó los aportes de materia orgánica y otro 25 % seleccionó la opción “otras razones”, relacionadas principalmente con la disponibilidad del recurso y el interés en prácticas agrícolas sostenibles. Ninguno de los participantes indicó el evitar el pago de tarifas como motivación.

Estos resultados reflejan que las razones de carácter agronómico y ambiental son los factores más influyentes en la aceptación del reuso del efluente, priorizándose los beneficios productivos sobre los aspectos económicos.

3.4.2.6. Comparación de la preferencia de los productores entre el uso de agua residual depurada y su fuente actual de riego

Figura 19. Comparación de la preferencia de los productores entre el uso de agua residual depurada y su fuente actual de riego



Fuente: Elaboración propia, a partir de las encuestas aplicadas a productores de tabaco del municipio de Estelí, (2025).

La Figura 19 refleja la percepción de los productores agrícolas respecto a la atractividad del uso de agua residual depurada frente a su fuente actual de riego. Los resultados muestran una división equitativa entre las respuestas: el 50 % de los encuestados consideró que el uso del efluente de la STAR representa una opción más conveniente, mientras que el otro 50 % manifestó preferir mantener su fuente de abastecimiento actual.

Esta distribución evidencia una diversidad de criterios entre los productores, posiblemente asociada a factores como la confianza en la calidad del agua tratada, la estabilidad de su fuente actual y las condiciones económicas vinculadas al pago por concesión. De forma panorámica, los resultados sugieren que, si bien existe una apertura hacia el reuso del efluente tratado, su adopción plena requerirá procesos de sensibilización técnica y demostración de beneficios

agronómicos que fortalezcan la percepción de seguridad y viabilidad de esta alternativa.

3.4.2.7. Interés en prueba piloto

Figura 20. Interés de los encuestados en participar en una prueba piloto



Fuente: Elaboración propia, a partir de las encuestas aplicadas a productores de tabaco del municipio de Estelí, (2025).

El análisis de los resultados pone en manifiesto que el 100 % de los productores encuestados manifestó su disposición a participar en un proyecto piloto orientado a la implementación del reuso de agua residual depurada en el riego agrícola. Este resultado refleja una actitud altamente positiva y colaborativa por parte del sector tabacalero, evidenciando apertura hacia la adopción de prácticas sostenibles que promuevan el aprovechamiento eficiente del recurso hídrico.

La aceptación total por parte de los participantes constituye un indicador clave de viabilidad social y técnica para el desarrollo de futuras etapas del proyecto, ya que demuestra interés en la aplicación práctica y en la validación de los beneficios agronómicos del efluente. Además, esta disposición voluntaria a involucrarse en procesos de prueba y evaluación contribuye a fortalecer el vínculo entre los

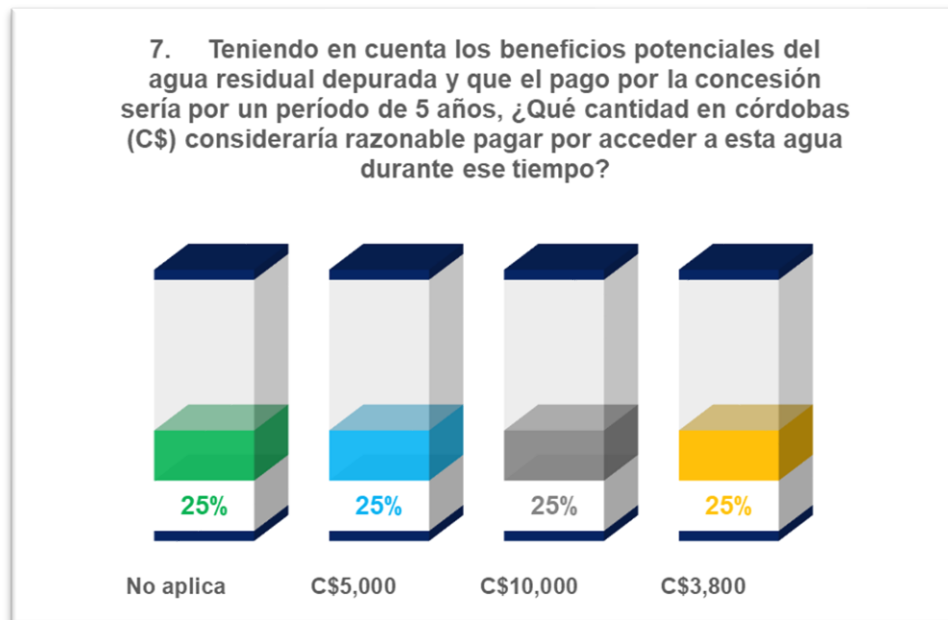
productores y las entidades gestoras de la STAR, facilitando la transferencia de conocimiento y la apropiación de tecnologías sostenibles.

En conjunto, este nivel de aceptación confirma que existe una base sólida de cooperación local para avanzar hacia la implementación de esquemas de reuso agrícola del efluente, consolidando un paso importante hacia la gestión responsable y el aprovechamiento integral del agua en el municipio de Estelí.

3.4.2.8. DAP de los encuestados

La encuesta realizada en este trabajo investigativo tuvo como propósito identificar el monto monetario o la disposición a pagar (DAP) de los encuestados para la adquisición de agua residual tratada con fines de reuso agrícola. En la Figura 18 se presentan los valores asignados por cada participante, obtenidos a través de preguntas abiertas.

Figura 21. DAP de los participantes



Fuente: Elaboración propia, a partir de las encuestas aplicadas a productores de tabaco del municipio de Estelí, (2025).

La Figura 20 presenta los valores declarados por los cuatro productores agrícolas respecto a la cantidad que considerarían razonable pagar por la concesión del

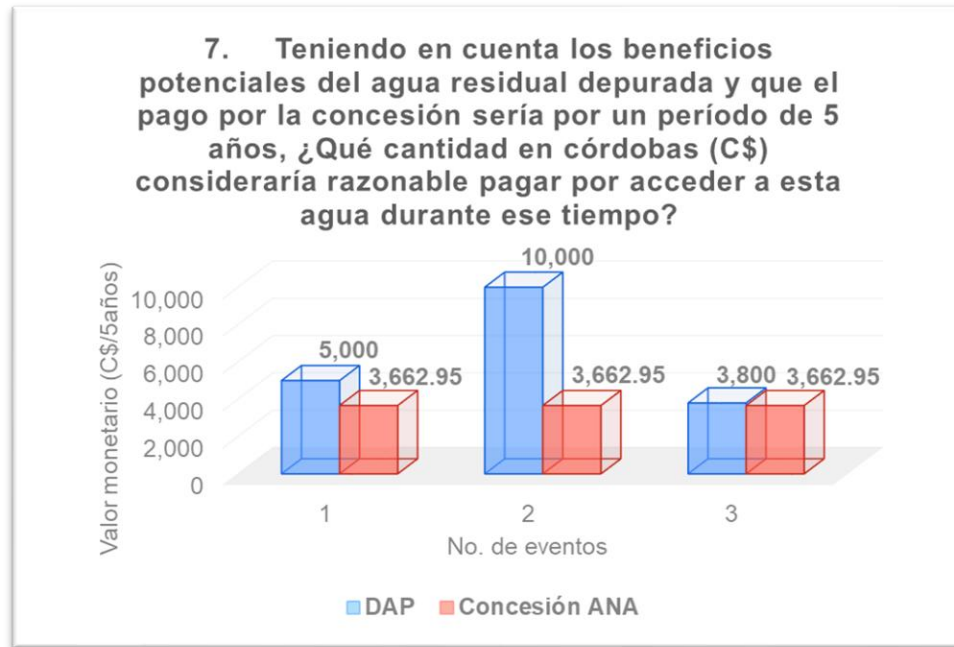
agua residual tratada durante un período de cinco años. Dado que se trata de una pregunta abierta, cada respuesta representa el 25 % del total de participantes. Uno de los encuestados manifestó una disposición a pagar de C\$3,800, otro de C\$5,000, y un tercero de C\$10,000, mientras que el último seleccionó la opción “no aplica”, al no definir un monto específico.

3.4.3. Evaluación económica de la disposición a pagar (DAP) por el reuso del efluente

Se desprende los datos obtenidos una heterogeneidad en la valoración económica del recurso depurado, influenciada probablemente por factores como el tamaño de las áreas cultivadas, la disponibilidad de fuentes de agua propias y el nivel de interés en la adopción del reuso. En general, los resultados reflejan una actitud favorable hacia el pago por concesión, aunque con diferencias en los montos percibidos como razonables, lo cual servirá de referencia para futuras estimaciones de la disposición a pagar dentro de escenarios de viabilidad comercial.

A partir de los valores asignados de DAP por cada encuestado interesado en la adquisición del agua residual depurada, se procedió a realizar la comparación con la concesión vigente en el país de acuerdo a los lineamientos de la autoridad ambiental ANA, (2022) como se evidencia en la Figura 19.

Figura 22. Comparación entre DAP y concesión ANA



Fuente: Elaboración propia, a partir de las encuestas aplicadas a productores de tabaco del municipio de Estelí, (2025).

El gráfico anterior evidencia una tendencia diferenciada entre los valores de disposición a pagar (DAP) y el monto establecido por la concesión de la ANA. En el evento 1, el productor manifestó una DAP de C\$5,000, ligeramente superior al valor de referencia (C\$3,662.95). En el evento 2, se observa la mayor diferencia, con una DAP de C\$10,000, lo cual refleja un mayor reconocimiento del valor económico del agua residual depurada. Finalmente, en el evento 3, la DAP fue de C\$3,800, muy cercana al valor oficial, mostrando una relación más equilibrada entre ambas variables.

Globalmente, los resultados exponen una tendencia ascendente en la valoración del recurso tratado, lo que sugiere una aceptación positiva y disposición real de pago por parte de los productores agrícolas, reconociendo los beneficios potenciales del reuso de aguas residuales depuradas en comparación con las fuentes convencionales de riego.

- Valor promedio de la DAP

Finalmente, se precisó el valor promedio de la DAP con base a los valores asignados por los cañeros que se encuentran interesados en adquirir el agua residual tratada, obteniendo una DAP de C\$6,266.67.

Tabla 20. Valor promedio de DAP

| PARÁMETRO | TOTAL INTERESADOS | | | ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA | | | |
|-----------------|-------------------|----------|---------|-------------------------|---------|--------|---------|
| | 1 | 2 | 3 | VAR | DESV | CV | MEDIA |
| DAP (C\$/5años) | 5000.00 | 10000.00 | 3800.00 | 10813333.33 | 3288.36 | 52.47% | 6266.67 |

Fuente: Elaboración propia, a partir de las encuestas aplicadas a productores de tabaco del municipio de Estelí, (2025).

Según los resultados obtenidos en la Tabla 20, tres de los cuatro productores encuestados indicaron un valor monetario correspondiente a su disposición a pagar (DAP) por la concesión de uso del agua residual depurada durante un período de cinco años, mientras que uno no proporcionó respuesta. El valor promedio calculado fue de C\$6,266.67, lo que refleja una actitud favorable hacia la implementación del reuso del efluente tratado como una alternativa de riego agrícola viable en el municipio de Estelí.

La desviación estándar de C\$3,288.36 y el coeficiente de variación del 52.47% evidencian cierta variación en los valores propuestos, asociada principalmente a las diferencias en el tamaño de los predios, la disponibilidad actual de fuentes de agua y la percepción particular del valor del recurso. Aun así, los resultados ponen de manifiesto una disposición real de los productores a asumir un costo por el aprovechamiento del efluente, lo que constituye un indicio positivo para el desarrollo de esquemas sostenibles de gestión hídrica en el sector tabacalero.

Estos hallazgos respaldan la viabilidad económica del reuso del efluente, dado que la DAP promedio representa una base razonable para proyectar ingresos complementarios que contribuyan al sostenimiento operativo y financiero de la STAR. Asimismo, confirman que el uso planificado del agua residual depurada puede consolidarse como una opción técnica y económicamente factible,

promoviendo un uso más eficiente y responsable del recurso en la actividad agrícola local.

Así lo argumenta Furlong et al. (2016), citado por Ruiz (2020), al señalar que la industria del agua recurre a generar sus propios modelos financieros para garantizar la sostenibilidad y viabilidad de sus operaciones. Bajo esta perspectiva, la disposición de los productores a pagar por la concesión del agua residual depurada constituye un indicador alentador para fortalecer la gestión del recurso hídrico y avanzar hacia un modelo de reuso con beneficios económicos, sociales y ambientales sostenibles en el municipio de Estelí.

3.4.4. Conclusión del objetivo 4

El análisis de la disposición a pagar (DAP) evidenció una actitud favorable de los productores hacia la adquisición del efluente proveniente de la STAR de Estelí con fines de reuso agrícola, reflejando el reconocimiento del valor productivo y ambiental que este recurso puede aportar al sistema de riego del cultivo de tabaco. Si bien los valores asignados presentan cierta variabilidad, esta responde a factores como el tamaño de las áreas cultivadas, la disponibilidad de fuentes hídricas propias y el nivel de interés en la adopción del reuso. De modo general, los resultados permiten establecer una referencia económica que respalda la viabilidad comercial del aprovechamiento del efluente, al demostrar que existe una base real de aceptación y disposición a participar en esquemas de concesión que promuevan el uso sostenible del recurso dentro del contexto agrícola local.

CONCLUSIONES



1. El caudal promedio registrado de 232.88 L/s, equivalente a 7,364,970 m³/año, frente a una demanda estimada de 542,500 m³/año para las 31 manzanas de tabaco evaluadas, evidencia que el efluente cubre únicamente el 7.37 % de su oferta hídrica disponible, presentando un excedente del 92.63 % y una relación de suficiencia de 13.58 veces el volumen requerido. Estos resultados confirman que la STAR de Estelí dispone de capacidad hidráulica ampliamente suficiente y estable para abastecer el riego agrícola en su zona de influencia, incluso considerando posibles pérdidas operativas.
2. Los análisis fisicoquímicos demostraron que el efluente cumple con la NTON 05-027-05 (Categoría 3, Tipo C) en parámetros como pH (6.16 dentro del rango 6–9), DBO₅ (60.787 mg/L < 200 mg/L), conductividad eléctrica (0.51 dS/m < 4 dS/m) y fósforo total (1.97 mg/L dentro del límite permisible). Sin embargo, el nitrógeno total presentó una concentración promedio de 32.25 mg/L, superior al valor de referencia normativo, constituyendo un incumplimiento regulatorio puntual, aunque desde el enfoque agronómico representa un aporte fertilizante significativo. El parámetro microbiológico, con una concentración promedio de 1.6×10^4 NMP/100 mL de Escherichia coli, supera el límite recomendado por la OMS ($\leq 10^4$ NMP/100 mL), evidenciando que el efluente no cumple para reuso agrícola directo sin desinfección adicional.
3. Desde el punto de vista agronómico, la conductividad eléctrica promedio de 0.51 dS/m clasifica el efluente dentro de la categoría sin restricción por salinidad según la FAO, lo que indica ausencia de riesgo de acumulación salina en el suelo bajo manejo adecuado. Los valores de RAS (0.553–0.611) y RASmod (0.922–0.984) reflejan bajo riesgo de sodicidad y alcalinización, evidenciando que la relación sodio–calcio–magnesio no compromete la estructura ni la infiltración del suelo. Asimismo, las concentraciones de sodio (≈ 1.74 meq/L) y cloruros (≈ 1.04 meq/L) se ubican en la categoría sin restricción para riego por aspersión, descartando efectos de toxicidad iónica sobre el cultivo.

En cuanto al componente nutricional, el nitrógeno (32.25 mg/L) y el magnesio (40.51 mg/L) representan aportes significativos con potencial fertilizante, mientras que el fósforo (1.97 mg/L) y el potasio (6.58 mg/L) se encuentran por debajo de los requerimientos típicos del cultivo, por lo que requieren complementación. De manera integral, el efluente resulta agronómicamente apto, sin limitaciones por salinidad, sodicidad o toxicidad, y con valor fertilizante parcial que puede integrarse al plan de manejo nutricional del tabaco.

4. Finalmente, el análisis socioeconómico evidenció aceptación total por parte de los productores encuestados y una disposición a pagar promedio de C\$6,266.67, valor superior al costo oficial de concesión establecido por la ANA, lo que respalda la viabilidad comercial del reuso del efluente. El análisis en conjunto, los resultados confirman que el efluente es hidráulica y agronómicamente apto, y comercialmente factible, quedando como principal condicionante la implementación de medidas de control microbiológico para garantizar su uso seguro en riego agrícola

RECOMENDACIONES



- ✓ Se recomienda que la Alcaldía Municipal de Estelí, en coordinación con ENACAL, MARENA y el MINSA, establezca lineamientos técnicos específicos para el eventual reuso agrícola del efluente de la STAR, incorporando criterios de control sanitario, monitoreo continuo y manejo nutrimental. Dado que la normativa nacional vigente no contempla de forma integral todos los parámetros relacionados con fertirriego, resulta pertinente fortalecer el marco regulatorio local para garantizar que cualquier implementación futura se realice bajo criterios técnicos y ambientales sólidos.
- ✓ Considerando que la concentración promedio de Escherichia coli (1.6×10^4 NMP/100 mL) supera el límite recomendado por la OMS ($\leq 10^4$ NMP/100 mL), se recomienda implementar sistemas complementarios de desinfección antes de cualquier uso agrícola del efluente. El incumplimiento de este parámetro implica riesgo sanitario potencial para trabajadores y posible afectación de la inocuidad del producto, particularmente en sistemas donde exista contacto con la parte aérea del cultivo. Se sugiere evaluar alternativas viables como cloración controlada o radiación ultravioleta, ajustadas a la capacidad operativa del municipio.
- ✓ En relación con el nitrógeno total (32.25 mg/L), cuyo valor supera el límite establecido por la NTON 05-027-05, se recomienda realizar estudios complementarios que permitan evaluar su fraccionamiento (amonio, nitrato y nitrito), su dinámica en el suelo y su potencial de lixiviación. El incumplimiento de este parámetro podría generar acumulación excesiva de nitratos o riesgo de contaminación de aguas subterráneas si no se gestiona adecuadamente. No obstante, desde el enfoque agronómico, su concentración representa un aporte fertilizante que debe integrarse de manera controlada al plan de nutrición del cultivo.
- ✓ En caso de que el efluente sea autorizado para riego agrícola en el futuro, se recomienda que el método de aplicación priorizado sea el riego por goteo, debido a que reduce el contacto directo con la parte aérea del

cultivo, disminuye la dispersión de microorganismos y optimiza el aprovechamiento del nitrógeno presente en el agua. Esta recomendación se fundamenta en que el análisis de toxicidad iónica fue realizado bajo el escenario más restrictivo (aspersión), por lo que el goteo podría representar una alternativa técnicamente más segura.

- ✓ Asimismo, se considera necesario establecer un programa permanente de monitoreo del efluente, con énfasis en parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y de caudal, que permita evaluar su comportamiento a lo largo del año y detectar oportunamente posibles desviaciones en la calidad del agua. Este programa debe integrarse a la gestión operativa de la STAR y servir como herramienta de respaldo técnico para la toma de decisiones por parte de las autoridades locales.
- ✓ Previo a una implementación a mayor escala, se sugiere desarrollar un plan piloto de reuso agrícola en parcelas cercanas a la STAR, bajo supervisión técnica y con la participación de productores locales. Este piloto permitirá validar los resultados obtenidos en el presente estudio, evaluar la aceptación social del reuso y establecer lineamientos operativos adaptados a la realidad productiva del municipio.
- ✓ Finalmente, se sugiere que futuras investigaciones profundicen en estudios de campo que evalúen el comportamiento microbiológico post-aplicación, la respuesta fisiológica del cultivo bajo riego con efluente depurado y el impacto acumulativo de nutrientes y sales en el suelo. Estas líneas de investigación permitirán consolidar evidencia técnica para una implementación progresiva, segura y sostenible del reuso agrícola en el municipio de Estelí.

BIBLIOGRAFÍA

- Al-Hazmi, H. E., Mohammadi, A., Hejna, A., Majtacz, J., Esmaeili, A., Habibzadeh, S., Saeb, M. R., Badawi, M., Lima, E. C., & Mañinia, J. (2023). Wastewater reuse in agriculture: Prospects and challenges. *Environmental Research*, 236, 116711. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2023.116711>
- Alvarado, F. (2011). *Identificación de suelos con problemas de sodicidad en Villa de Ramos, San Luis Potosí*. <https://repositorioinstitucional.uaslp.mx/xmlui/handle/i/3399>
- APHA, AWWA, & WEF. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (23rd ed.). American Public Health Association. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2459667>
- Arauz, C. (2022). *Manejo agronómico del cultivo de tabaco (Nicotiana tabacum L.), bajo condiciones de agricultura protegida en la Finca La joya, Estelí 2020*.
- Asamblea Nacional de Nicaragua. (2006). *Norma técnica N° NTON 05 027-05: "Norma técnica obligatoria nicaragüense para regular los sistemas de tratamientos de aguas residuales y su reuso."* <http://legislacion.asamblea.gob.ni/normaweb.nsf/9e314815a08d4a6206257265005d21f9/3b3583b8c7d4ee32062579bc007b7023?OpenDocument#:~:text=NTON%2005%20027%2D05%2C%20Norma,octubre%20del%20dos%20mil%20cinco.>
- Asamblea Nacional de Nicaragua. (2017). *Decreto Ejecutivo N° 21-2017: "Reglamento en el que se establecen las disposiciones para el vertido de aguas residuales."* <http://legislacion.asamblea.gob.ni/normaweb.nsf/b92aaea87dac762406257265005d21f7/a35cf61591ad2d57062581f30056f9ec>
- Autoridad Nacional del Agua. (2022). *Resolución Administrativa Interna RAI-ANA-DE-0046-2022*. <http://www.inaa.gob.ni/sites/default/files/inline-files/1.%20Resoluci%C3%B3n%20RAI-ANA-DE-046->

2022%2C%20Aprobaci%C3%B3n%20de%20ingresos%20percibidos%20por%20tr%C3%A1mites%20administrativos.PDF

- Barreto, P. (2009). *Instructivo de medición de caudal*.
https://biorem.univie.ac.at/fileadmin/user_upload/p_biorem/education/research/protocols/INSTRUCTUVO_DE_MEDICI%C3%93N_DE_CAUDAL.pdf
- Bello, M., & Pino, M. (2000). *Medición de presión y caudal*.
<https://biblioteca.inia.cl/server/api/core/bitstreams/6413014a-822b-4c17-bcaf-51605948bc7f/content#:~:text=El%20m%C3%A9todo%20del%20flotador%20se,se%20requiere%20una%20mayor%20precisi%C3%B3n>
- Bhattacharya, T., Chakraborty, S., & Tuck, N. (2012). *Physico chemical Characterization of ground water of Anand district, Gujarat, India*.
<https://www.isca.in/IJENS/Archive/v1/i1/5.ISCA-IRJEvsS-2012-011.pdf>
- Brand, E. (2017). *Disponibilidad a pagar por servicios de agua de uso múltiple. Caso de estudio acueducto Las Palmas Tres Puertas (Restrepo – Valle del Cauca)*.
<https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/entities/publication/a05901db-f4ff-438d-b884-75c1d4e3b5a8>
- Díaz, A., Navarro, S., & Dicovski, L. (2019). *Zonificación de la hoja de tabaco producida en la región norte de Nicaragua, para indicación geográfica*.
- Díaz, M. (2014). *Manejo de aguas residuales en pequeñas comunidades*.
<https://studylib.es/doc/8055147/cap%C3%ADtulo-4.-estimaci%C3%B3n-y-medici%C3%B3n-de-caudales-de-aguas-re>
- Echeverri, A. (2011). *Reuso para riego del efluente de la PTAR-C: evaluación del potencial impacto en las propiedades físicas del suelo y la productividad de la variedad de caña de azúcar CC85-95* [Universidad de Valle].
<https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/server/api/core/bitstreams/67a3bced-d329-45ab-90ca-bb36676a8283/content>

- Escalante, V., Cardoso, L., Ramírez, E., Moeller, G., Mantilla, G., Montecillos, J., Servín, C., & Villavicencio, F. (2014). *El reuso del agua residual en México*. https://www.researchgate.net/publication/287975365_Seleccion_de_Tecnologias_para_el_Tratamiento_de_Aguas_Residuales_Municipales_guia_de_apoyo_para_ciudades_pequenas_y_medianas/link/567abcbc08ae1e63f1df6212/download?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uliwicGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIn19
- Espinosa, M. L., López, D., & Incer, R. (2016). *Situación del riego en Nicaragua*. <https://guiagronicaragua.com/wp-content/uploads/2016/10/Situaci%C3%B3n-del-Riego-en-Nicargua-MLE-Edi2016.pdf>
- FAO: "Food and agriculture organization of the United Nations." (1985). *Water quality for agriculture* (29th ed., Vol. 1). <https://www.fao.org/3/t0234e/t0234e.pdf>
- FAO: "Food and agriculture organization of the United Nations." (2006). *Estimación de caudales de agua*. https://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6705s/x6705s03.htm#23a
- García, N. A., Álvarez, F. B., & Sierra, A. L. M. (2018). Circular Economy in the Manufacture of Bioplastics: From Sewage Sludge to Plastic Bottle. *Proceedings 2018, Vol. 2, Page 1425, 2(23), 1425*. <https://doi.org/10.3390/PROCEEDINGS2231425>
- Giraldo, G. (1995). *Manual de análisis de aguas*. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/55218/manualdeanalisisdeaguas.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=El%20an%C3%A1lisis%20fisicoqu%C3%ADmico%20de%20un,de%20las%20plantas%20de%20tratamiento>

- Gobierno de Nicaragua. (2019). ENACAL: “Empresa Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillado Sanitario.” In *Managua, Nicaragua*. <https://www.enacal.com.ni/>
- Gobierno de Reconciliación y Unidad Nacional. (2021). *Plan Nacional de Lucha contra la Pobreza y para el Desarrollo Humano 2022-2026*. [https://www.pndh.gob.ni/documentos/pnlc-dh/PNCL-DH_2022-2026\(19Jul21\).pdf](https://www.pndh.gob.ni/documentos/pnlc-dh/PNCL-DH_2022-2026(19Jul21).pdf)
- Gómez, M. (2012). *Estudio de un cultivo de tabaco bajo invernadero para la obtención de biomasa y productos de alto valor en la industria regado con agua residual urbana depurada*. <https://repositorio.ual.es/handle/10835/1078>
- Herruzo, C. (2002). *Fundamentos y métodos para la valoración de bienes ambientales*. https://ecodecision.com.ec/wp-content/uploads/2016/08/Herruzo-_2002.pdf
- IDEAM: “Instituto de hidrología; meteorología y estudios ambientales.” (2015). *Estudio nacional del agua 2014*. https://www.andi.com.co/Uploads/ENA_2014.pdf
- IICA: “Instituto interamericano de cooperación para la agricultura.” (2018). *El mercado y la comercialización*. <https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/7088/BVE18040224e.pdf?sequence=1>
- INNOTECH Laboratorios. (2021). *Catálogo general agrícola*. <https://www.innotec-laboratorios.es/wp-content/uploads/2019/05/Catalogo-agricola.pdf>
- Kundu, D., Dutta, D., Samanta, P., Dey, S., Sherpa, K. C., Kumar, S., & Dubey, B. K. (2022a). Valorization of wastewater: A paradigm shift towards circular bioeconomy and sustainability. *Science of The Total Environment*, 848, 157709. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.157709>
- Kundu, D., Dutta, D., Samanta, P., Dey, S., Sherpa, K. C., Kumar, S., & Dubey, B. K. (2022b). Valorization of wastewater: A paradigm shift towards circular

bioeconomy and sustainability. *Science of The Total Environment*, 848, 157709. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.157709>

MAPA: “Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación.” (2007). *Manual de gestión de buenas prácticas agrícolas para la producción de tabaco en España*.

<https://www.mapa.gob.es/dam/mapa/contenido/agricultura/temas/produccion-es-agricolas/tabaco/manual-de-buenas-practicas-agricolas-en-tabaco/manual.pdf>

Marchetti, R., Castelli, F., & Contillo, R. (2006). *Nitrogen requirements for flue-cured tobacco*.

https://www.researchgate.net/publication/240783557_Nitrogen_Requirements_for_Flue-Cured_Tobacco

Metcalf & Eddy. (2014). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery* (05 ed.). McGraw-Hill Education.

<https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1570736>

Morgan, J., Morgan, C., Ramírez, B., & Noyola, A. (2023). *Tratamiento y reúso de agua residual municipal: “Metodología para estimar el potencial de reúso en una región y evaluar el desempeño de plantas de tratamiento.”*

Nexo Revista Científica. (2017). *Carga superficial máxima en la lagunas de estabilización facultativas de Nicaragua* (01 ed., Vol. 30).

Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021: “Que Establece Los Límites Permisibles de Contaminantes En Las Descargas de Aguas Residuales En Cuerpos Receptores Propiedad de La Nación” (2021).

Noyola, A., Morgan-Sagastume, J., & Guereca, L. (2013). *Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales* (Primera edición).

OMS: “Organización Mundial de la Salud.” (2006). *WHO Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater: Volume I - Policy and regulatory*

aspects.

https://www.google.com.ni/books/edition/WHO_Guidelines_for_the_Safe_Use_of_Waste/RgfBRSNYZbMC?hl=es&gbpv=1

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

Parra, A. (2002). *Metodología estadística para estudios de disponibilidad a pagar en proyectos de abastecimiento de agua y saneamiento básico*.
https://www.academia.edu/6556136/Metodolog%C3%ADa_estad%C3%ADstica_para_estudios_de_Disponibilidad_a_Pagar_DAP_en_proyectos_de_abastecimiento_de_agua_y_saneamiento_b%C3%A1sico

Polanía, C., & Tolorza, D. (2020). *Evaluación del potencial del reuso de aguas residuales tratadas en la PTAR de El Cerrito para el riego en cultivos de caña de azúcar* [Universidad del Valle].
<https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/entities/publication/e53d0b5e-2f0c-4db9-85f3-f1b4309f13d2>

Qadir, M., Drechsel, P., Jiménez Cisneros, B., Kim, Y., Pramanik, A., Mehta, P., & Olaniyan, O. (2020). Global and regional potential of wastewater as a water, nutrient and energy source. *Natural Resources Forum*, 44(1), 40–51.
<https://doi.org/10.1111/1477-8947.12187>

Ruíz, J., Medina, G., González, I., Flores, H., Ramírez, G., Ortiz, C., Byerly, K., & Martínez, R. (2013). *Requerimientos agroecológicos de los cultivos* (Tercera edición).
https://www.researchgate.net/profile/Jose-Ruiz-Corral/publication/343047223_REQUERIMIENTOS_AGROECOLOGICOS_DE_CULTIVOS_2da_Edicion/links/5f1310e04585151299a4c447/REQUERIMIENTOS-AGROECOLOGICOS-DE-CULTIVOS-2da-Edicion.pdf

Ruiz-Rosa, I., García-Rodríguez, F., & Antonova, N. (2020). *Developing a methodology to recover the cost of wastewater reuse: A proposal based on the polluter pays principle*.

[https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095717872030062X?
via%3Dihub](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095717872030062X?via%3Dihub)

Seguí Amórtegui, L. A. (2004). *Sistemas de regeneración y reutilización de aguas residuales. Metodología para el análisis técnico-económico y casos*. España, Universidad Politécnica de Catalunya. <https://www.tdx.cat/handle/10803/7053;jsessionid=4DA911DD67CF76C6C5203D0A9EB20239#page=1>

SICA: “Sistema de la Interacción Centroamericana.” (2013). *Gestión de las excretas y aguas residuales, situación actual y perspectivas en Nicaragua*. <https://www.sica.int/download/?79734>

Smol, M. (2022). Circular economy approach in the water and wastewater sector. *Circular Economy and Sustainability: Volume 2: Environmental Engineering*, 1–19. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821664-4.00018-2>

Villada, A. (2014). *Documentación de los manuales para la toma de muestra de calidad del agua y vertimientos, realizados por la corporación autónoma regional de Risaralda - carder*. <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/79abaa53-b5a5-4e77-87d5-c6870723ce9f/content>

Villafañe, R. (2011). *Sosalriego: Un procedimiento para diagnosticar los riesgos de sodificación y salinización del suelo con el agua de riego* (Vol. 23). Bioagro. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=85719247008>

Voulvoulis, N. (2018). Water reuse from a circular economy perspective and potential risks from an unregulated approach. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2, 32–45. <https://doi.org/10.1016/J.COESH.2018.01.005>

Zarei, M. (2020). Wastewater resources management for energy recovery from circular economy perspective. *Water-Energy Nexus*, 3, 170–185. <https://doi.org/10.1016/J.WEN.2020.11.001>

ANEXOS

Encuesta para evaluar el potencial de comercialización del agua residual tratada para riego agrícola

1. ¿Conocía usted los beneficios del reuso de aguas residuales depuradas como alternativa de riego?

Si

No

2. ¿En qué sectores aledaños al sistema de tratamiento se encuentran localizados sus predios?

3. ¿Cuál es el área total en manzanas de los predios destinados al cultivo de tabaco, ubicados cerca del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales (STAR) en el municipio de Estelí?

4. Si existieran otras fuentes alternativas en la localidad disponibles para la irrigación de sus cultivos, ¿Estaría usted dispuesto a considerar la adquisición de agua residual depurada del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales (STAR) del municipio de Estelí?

Si

No

5. Seleccione las razones por las cuales usted estaría interesado en adquirir el agua residual depurada para el riego de cultivos de tabaco.

Aportes de materia orgánica

Aportes de nutrientes

Reducir el uso de agua potable

Evitar el pago de tarifas

Otros

No aplica

6. En caso de que tuviera la oportunidad de utilizar agua residual depurada para el riego de sus cultivos, mediante el pago por el derecho de aprovechamiento cada 5 años, ¿Consideraría esta alternativa más atractiva que su fuente actual para riego?

Sí, me parece una opción más conveniente

No, prefiero mantener mi fuente actual

Tal vez, dependiendo de las condiciones

7. Teniendo en cuenta los beneficios potenciales del agua residual tratada y que el pago por la concesión sería por un período de 5 años, ¿Qué cantidad en córdobas (C\$) consideraría razonable pagar por acceder a esta agua durante ese tiempo?

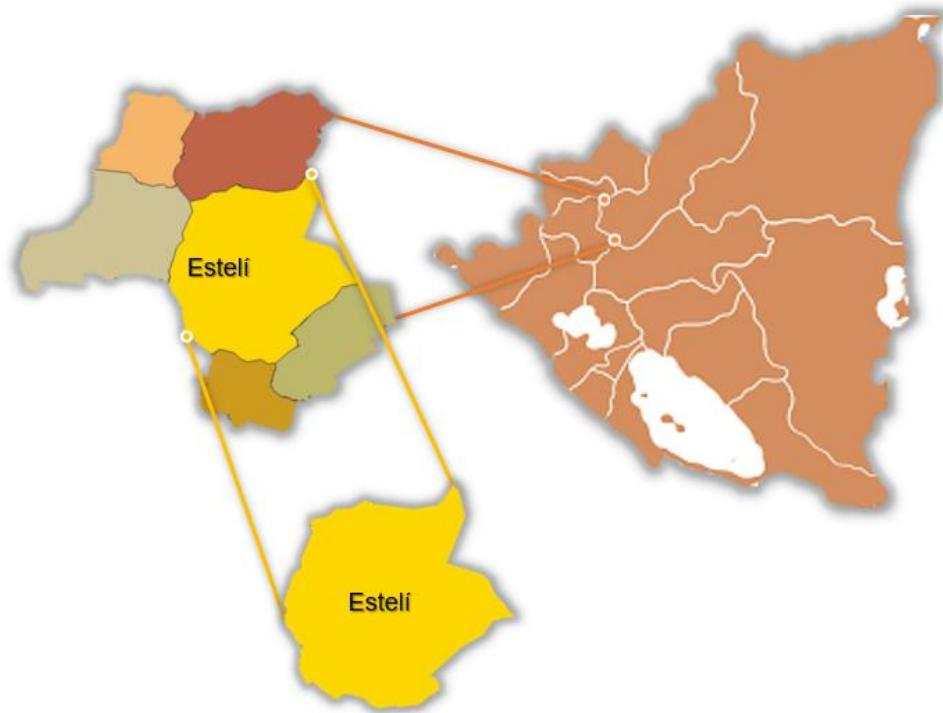
8. ¿Estaría dispuesto en participar en un proyecto piloto para la implementación del reuso de agua residual depurada en riego agrícola?

Si

No

https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSdceCypTBYpzmZTnk4pmKuxX6RiCY6kOoWIBNdhk_lw8MDQXA/viewform?usp=header

Figura 23. Macrolocalización



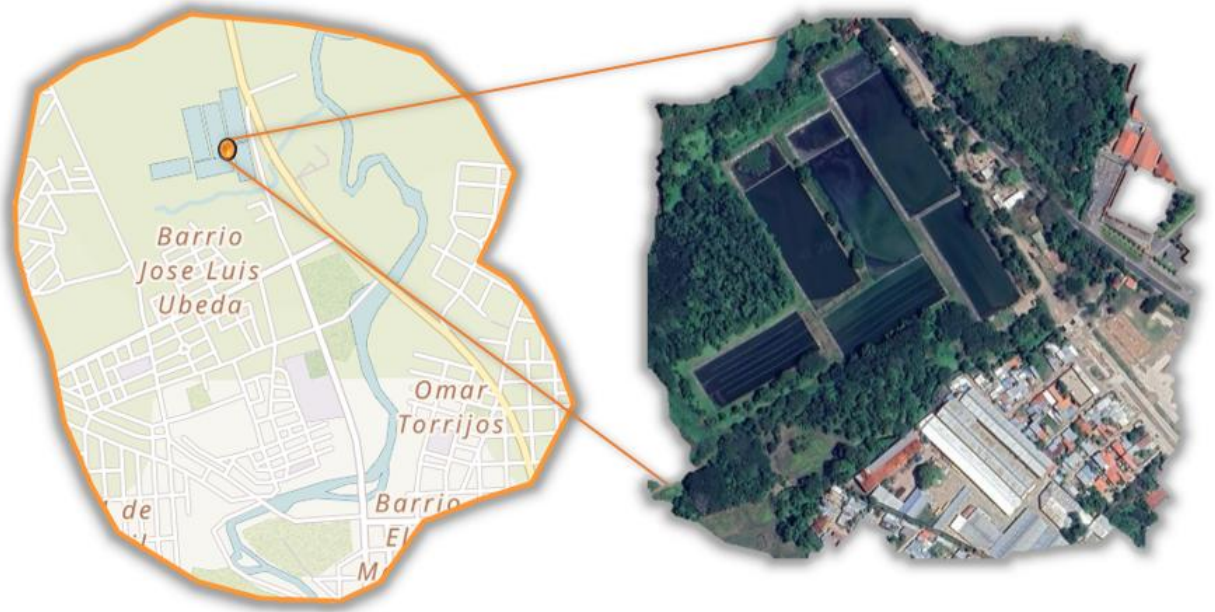
Fuente: Adaptado de Google Maps, (2025)

Figura 24. Microlocalización (Quebrada "La Limonosa")



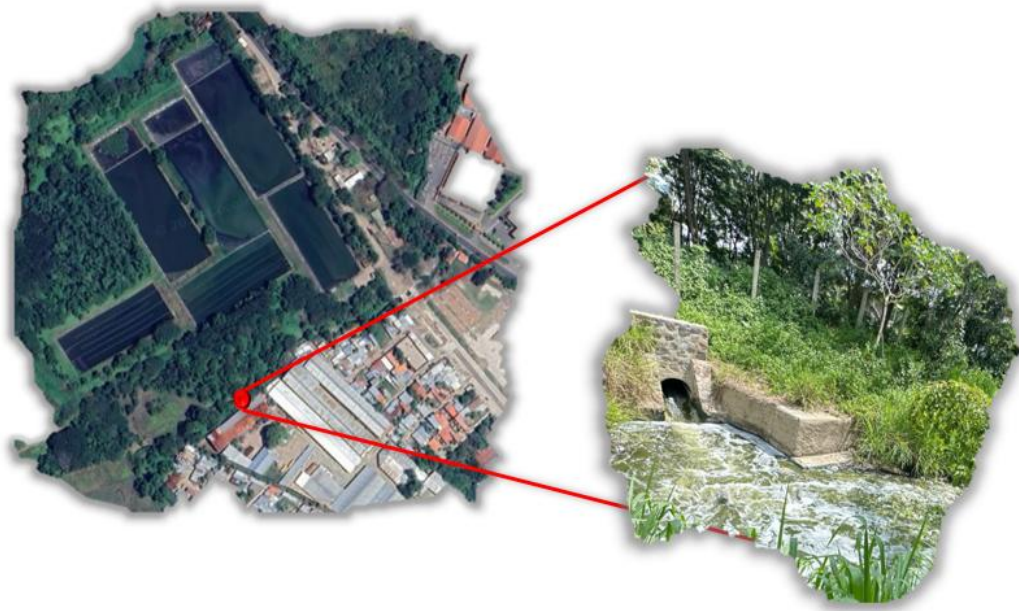
Fuente: Adaptado de Google Earth, (2025)

Figura 25. Microlocalización (STAR de Estelí)



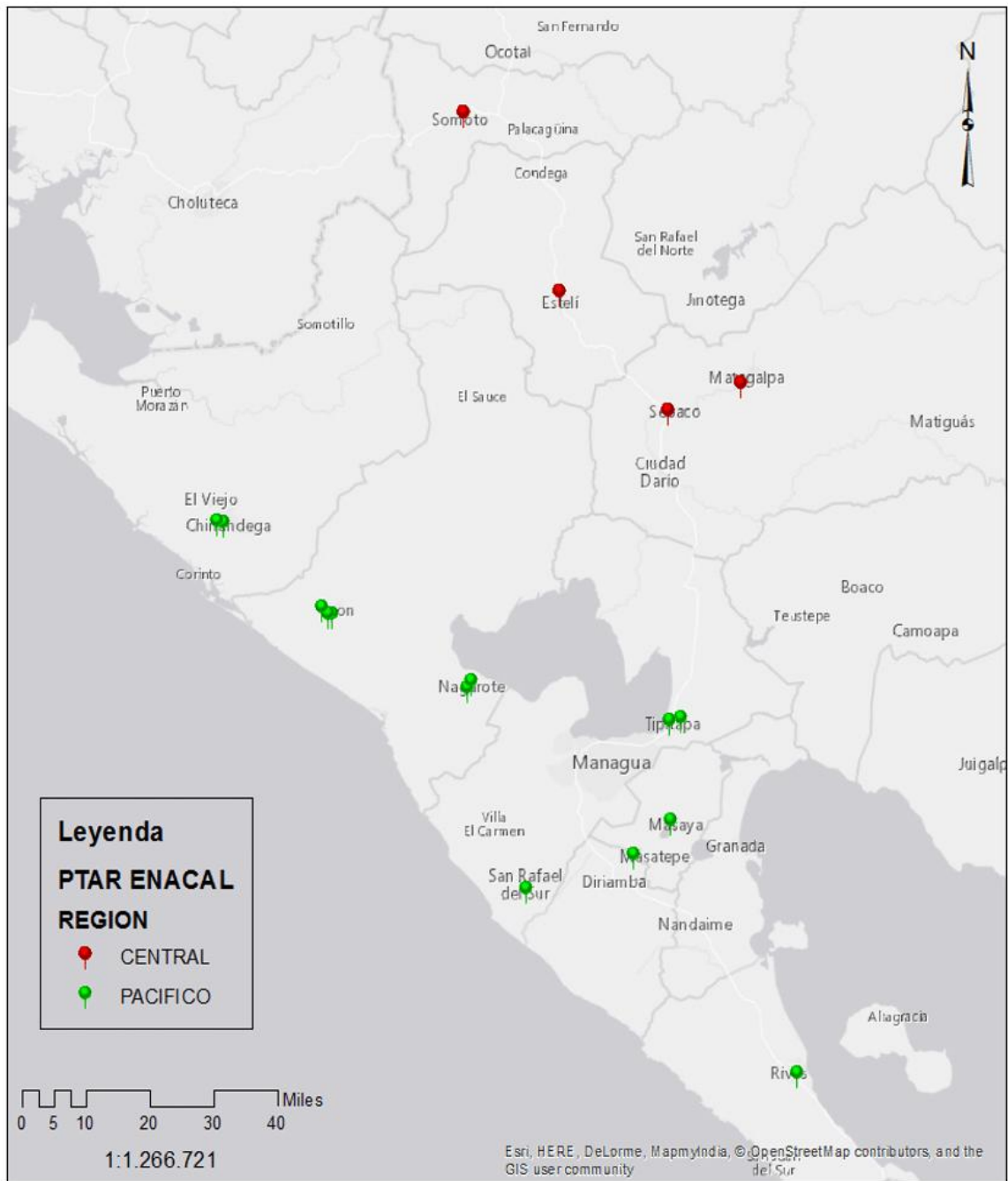
Fuente: Adaptado de Google Earth, (2025)

Figura 26. Microlocalización (Punto de descarga de la STAR Estelí)



Fuente: Adaptado de Google Earth, (2025)

Figura 27. Localización de los diferentes Sistemas de Tratamientos de Aguas Residuales municipales de Nicaragua



Fuente: Adaptado de Nexo Revista Científica, (2017)

Tabla 21. Parámetros físico-químicos establecidos por la NTON 05 027 05 para reuso de aguas residuales municipales

| Parámetros | Unidades | Límites máximos permisibles NTON 05 027-05 |
|-----------------------------------|---------------------|---|
| DBO₅ | mgO ₂ /L | 200 |
| Coliformes fecales | NMP/100mL | 1*10 ⁵ |
| Huevos de Helminos | cada 100mL | 1 |
| Nitrógeno total | mg/L | 15 |
| Fósforo total | mg/L | 5 |
| Tasa de adsorción de sodio | mg/L | 6 |
| Conductividad eléctrica | dS/m | 4(200mo) |

Fuente: Adaptado de NTON 05 027 05, (2006)

Tabla 22. Parámetros para evaluación de idoneidad agronómica por calidad de agua de riego

| Posibles problemas en el riego | Grado de restricción de uso | | |
|------------------------------------|-----------------------------|----------|--------|
| | Ninguno | Moderado | Severo |
| Salinidad | | | |
| CE (dS/m) | ≤0.7 | 0.7-3 | ≥ 3 |
| Toxicidad de ión específica | | | |
| Sodio (Na) (mg/L) | | | |
| Riego de superficie | ≤3 | 03-9 | ≥ 9 |
| Riego por aspersión | ≤70 | ≤70 | |
| Cloro (Cl) (mg/L) | | | |
| Riego superficial | ≤140 | 140-350 | ≥ 350 |
| Riego por aspersión | ≤100 | ≥100 | |
| Boro (B) (mg/L) | ≤0.7 | 0.7-3 | ≥ 3 |
| Otros efectos | | | |
| Nitrógeno Total (mg/L) | ≤5 | 5-30 | ≥ 30 |
| pH | Rango normal de 6.5-8 | | |

Fuente: Adaptado de Gómez, (2012)

Tabla 23. Ficha de campo para registro de medición de caudales

| Registros de Medición de Caudales | | | | | |
|-----------------------------------|------------------------|------------|-----------------|------------------------------------|----------------|
| Hora | Efluente | | | | |
| | Agua depurada | | | | |
| | Longitud del tramo (m) | Tiempo (s) | Velocidad (m/s) | Área transversal (m ²) | Caudal (lts/s) |
| 07:00 a.m. | | | | | |
| 08:00 a.m. | | | | | |
| 09:00 a.m. | | | | | |
| 10:00 a.m. | | | | | |
| 11:00 a.m. | | | | | |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 24. Aforo de caudal día lunes (aguas arriba)

| Registros de Medición de Caudales | | | | | |
|-----------------------------------|---------------------|------------|-----------------|------------------------------------|----------------|
| Hora | Efluente | | | | |
| | Agua depurada | | | | |
| | Long. del tramo (m) | Tiempo (s) | Velocidad (m/s) | Área transversal (m ²) | Caudal (Lts/s) |
| 7:00am | 12.8 | 80.580 | 0.159 | 0.283 | 38.203 |
| 8:00am | 12.8 | 77.428 | 0.165 | 0.283 | 39.758 |
| 9:00am | 12.8 | 78.206 | 0.164 | 0.283 | 39.362 |
| 10:00am | 12.8 | 79.162 | 0.162 | 0.283 | 38.887 |
| 11:00am | 12.8 | 80.094 | 0.160 | 0.283 | 38.435 |
| CAUDAL PROMEDIO= | | | | | 38.929 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 25. Aforo de caudal día lunes (aguas abajo)

| Registros de Medición de Caudales | | | | | |
|--|----------------------------|-------------------|------------------------|---|-----------------------|
| Hora | Efluente | | | | |
| | Agua depurada | | | | |
| | Long. del tramo (m) | Tiempo (s) | Velocidad (m/s) | Área transversal (m²) | Caudal (Lts/s) |
| 7:00am | 18.52 | 43.434 | 0.426 | 0.728 | 263.886 |
| 8:00am | 18.52 | 42.466 | 0.436 | 0.728 | 269.901 |
| 9:00am | 18.52 | 41.092 | 0.451 | 0.728 | 278.926 |
| 10:00am | 18.52 | 41.318 | 0.448 | 0.728 | 277.401 |
| 11:00am | 18.52 | 42.220 | 0.439 | 0.728 | 271.474 |
| CAUDAL PROMEDIO= | | | | | 272.318 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 26. Aforo de caudal día martes (aguas arriba)

| Registros de Medición de Caudales | | | | | |
|--|----------------------------|-------------------|------------------------|---|-----------------------|
| Hora | Efluente | | | | |
| | Agua depurada | | | | |
| | Long. del tramo (m) | Tiempo (s) | Velocidad (m/s) | Área transversal (m²) | Caudal (Lts/s) |
| 7:00am | 12.8 | 80.566 | 0.159 | 0.283 | 38.209 |
| 8:00am | 12.8 | 77.632 | 0.165 | 0.283 | 39.653 |
| 9:00am | 12.8 | 78.168 | 0.164 | 0.283 | 39.382 |
| 10:00am | 12.8 | 79.324 | 0.161 | 0.283 | 38.808 |
| 11:00am | 12.8 | 79.856 | 0.160 | 0.283 | 38.549 |
| CAUDAL PROMEDIO= | | | | | 38.920 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 27. Aforo de caudal día martes (aguas abajo)

| Registros de Medición de Caudales | | | | | |
|--|----------------------------|-------------------|------------------------|---|-----------------------|
| Hora | Efluente | | | | |
| | Agua depurada | | | | |
| | Long. del tramo (m) | Tiempo (s) | Velocidad (m/s) | Área transversal (m²) | Caudal (Lts/s) |
| 7:00am | 18.52 | 43.626 | 0.425 | 0.728 | 262.725 |
| 8:00am | 18.52 | 42.062 | 0.440 | 0.728 | 272.494 |
| 9:00am | 18.52 | 41.742 | 0.444 | 0.728 | 274.583 |
| 10:00am | 18.52 | 41.354 | 0.448 | 0.728 | 277.159 |
| 11:00am | 18.52 | 41.952 | 0.441 | 0.728 | 273.208 |
| CAUDAL PROMEDIO= | | | | | 272.034 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 28. Aforo de caudal día miércoles (aguas arriba)

| Registros de Medición de Caudales | | | | | |
|--|----------------------------|-------------------|------------------------|---|-----------------------|
| Hora | Efluente | | | | |
| | Agua depurada | | | | |
| | Long. del tramo (m) | Tiempo (s) | Velocidad (m/s) | Área transversal (m²) | Caudal (Lts/s) |
| 7:00am | 12.8 | 80.378 | 0.159 | 0.283 | 38.299 |
| 8:00am | 12.8 | 78.366 | 0.163 | 0.283 | 39.282 |
| 9:00am | 12.8 | 78.402 | 0.163 | 0.283 | 39.264 |
| 10:00am | 12.8 | 79.364 | 0.161 | 0.283 | 38.788 |
| 11:00am | 12.8 | 80.264 | 0.159 | 0.283 | 38.353 |
| CAUDAL PROMEDIO= | | | | | 38.797 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 29. Aforo de caudal día miércoles (aguas abajo)

| Registros de Medición de Caudales | | | | | |
|--|----------------------------|-------------------|------------------------|---|-----------------------|
| Hora | Efluente | | | | |
| | Agua depurada | | | | |
| | Long. del tramo (m) | Tiempo (s) | Velocidad (m/s) | Área transversal (m²) | Caudal (Lts/s) |
| 7:00am | 18.52 | 43.302 | 0.428 | 0.728 | 264.691 |
| 8:00am | 18.52 | 42.374 | 0.437 | 0.728 | 270.487 |
| 9:00am | 18.52 | 41.360 | 0.448 | 0.728 | 277.119 |
| 10:00am | 18.52 | 41.022 | 0.451 | 0.728 | 279.402 |
| 11:00am | 18.52 | 42.270 | 0.438 | 0.728 | 271.153 |
| CAUDAL PROMEDIO= | | | | | 272.570 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 30. Aforo de caudal día jueves (aguas arriba)

| Registros de Medición de Caudales | | | | | |
|--|----------------------------|-------------------|------------------------|---|-----------------------|
| Hora | Efluente | | | | |
| | Agua depurada | | | | |
| | Long. del tramo (m) | Tiempo (s) | Velocidad (m/s) | Área transversal (m²) | Caudal (Lts/s) |
| 7:00am | 12.8 | 80.802 | 0.158 | 0.283 | 38.098 |
| 8:00am | 12.8 | 77.802 | 0.165 | 0.283 | 39.567 |
| 9:00am | 12.8 | 78.498 | 0.163 | 0.283 | 39.216 |
| 10:00am | 12.8 | 79.404 | 0.161 | 0.283 | 38.769 |
| 11:00am | 12.8 | 80.016 | 0.160 | 0.283 | 38.472 |
| CAUDAL PROMEDIO= | | | | | 38.824 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 31. Aforo de caudal día jueves (aguas abajo)

| Registros de Medición de Caudales | | | | | |
|--|----------------------------|-------------------|------------------------|---|-----------------------|
| Hora | Efluente | | | | |
| | Agua depurada | | | | |
| | Long. del tramo (m) | Tiempo (s) | Velocidad (m/s) | Área transversal (m²) | Caudal (Lts/s) |
| 7:00am | 18.52 | 43.446 | 0.426 | 0.728 | 263.813 |
| 8:00am | 18.52 | 42.458 | 0.436 | 0.728 | 269.952 |
| 9:00am | 18.52 | 41.368 | 0.448 | 0.728 | 277.065 |
| 10:00am | 18.52 | 41.778 | 0.443 | 0.728 | 274.346 |
| 11:00am | 18.52 | 42.210 | 0.439 | 0.728 | 271.538 |
| CAUDAL PROMEDIO= | | | | | 271.343 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 32. Aforo de caudal día viernes (aguas arriba)

| Registros de Medición de Caudales | | | | | |
|--|----------------------------|-------------------|------------------------|---|-----------------------|
| Hora | Efluente | | | | |
| | Agua depurada | | | | |
| | Long. del tramo (m) | Tiempo (s) | Velocidad (m/s) | Área transversal (m²) | Caudal (Lts/s) |
| 7:00am | 12.8 | 80.478 | 0.159 | 0.283 | 38.251 |
| 8:00am | 12.8 | 77.996 | 0.164 | 0.283 | 39.468 |
| 9:00am | 12.8 | 78.484 | 0.163 | 0.283 | 39.223 |
| 10:00am | 12.8 | 79.646 | 0.161 | 0.283 | 38.651 |
| 11:00am | 12.8 | 80.168 | 0.160 | 0.283 | 38.399 |
| CAUDAL PROMEDIO= | | | | | 38.798 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 33. Aforo de caudal día viernes (aguas abajo)

| Registros de Medición de Caudales | | | | | |
|--|----------------------------|-------------------|------------------------|---|-----------------------|
| Hora | Efluente | | | | |
| | Agua depurada | | | | |
| | Long. del tramo (m) | Tiempo (s) | Velocidad (m/s) | Área transversal (m²) | Caudal (Lts/s) |
| 7:00am | 18.52 | 43.388 | 0.427 | 0.728 | 264.166 |
| 8:00am | 18.52 | 42.264 | 0.438 | 0.728 | 271.191 |
| 9:00am | 18.52 | 41.466 | 0.447 | 0.728 | 276.410 |
| 10:00am | 18.52 | 41.472 | 0.447 | 0.728 | 276.370 |
| 11:00am | 18.52 | 42.244 | 0.438 | 0.728 | 271.320 |
| CAUDAL PROMEDIO= | | | | | 271.892 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 34. Aforo de caudal día sábado (aguas arriba)

| Registros de Medición de Caudales | | | | | |
|--|----------------------------|-------------------|------------------------|---|-----------------------|
| Hora | Efluente | | | | |
| | Agua depurada | | | | |
| | Long. del tramo (m) | Tiempo (s) | Velocidad (m/s) | Área transversal (m²) | Caudal (Lts/s) |
| 7:00am | 12.8 | 80.512 | 0.159 | 0.283 | 38.235 |
| 8:00am | 12.8 | 77.864 | 0.164 | 0.283 | 39.535 |
| 9:00am | 12.8 | 78.550 | 0.163 | 0.283 | 39.190 |
| 10:00am | 12.8 | 79.538 | 0.161 | 0.283 | 38.703 |
| 11:00am | 12.8 | 80.250 | 0.160 | 0.283 | 38.360 |
| CAUDAL PROMEDIO= | | | | | 38.805 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 35. Aforo de caudal día sábado (aguas abajo)

| Registros de Medición de Caudales | | | | | |
|--|----------------------------|-------------------|------------------------|---|-----------------------|
| Hora | Efluente | | | | |
| | Agua depurada | | | | |
| | Long. del tramo (m) | Tiempo (s) | Velocidad (m/s) | Área transversal (m²) | Caudal (Lts/s) |
| 7:00am | 18.52 | 43.562 | 0.425 | 0.728 | 263.111 |
| 8:00am | 18.52 | 42.386 | 0.437 | 0.728 | 270.411 |
| 9:00am | 18.52 | 41.758 | 0.444 | 0.728 | 274.478 |
| 10:00am | 18.52 | 41.660 | 0.445 | 0.728 | 275.123 |
| 11:00am | 18.52 | 41.954 | 0.441 | 0.728 | 273.195 |
| CAUDAL PROMEDIO= | | | | | 271.264 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 36. Aforo de caudal día domingo (aguas arriba)

| Registros de Medición de Caudales | | | | | |
|--|----------------------------|-------------------|------------------------|---|-----------------------|
| Hora | Efluente | | | | |
| | Agua depurada | | | | |
| | Long. del tramo (m) | Tiempo (s) | Velocidad (m/s) | Área transversal (m²) | Caudal (Lts/s) |
| 7:00am | 12.8 | 80.540 | 0.159 | 0.283 | 38.222 |
| 8:00am | 12.8 | 77.940 | 0.164 | 0.283 | 39.497 |
| 9:00am | 12.8 | 78.260 | 0.164 | 0.283 | 39.335 |
| 10:00am | 12.8 | 79.634 | 0.161 | 0.283 | 38.657 |
| 11:00am | 12.8 | 80.254 | 0.159 | 0.283 | 38.358 |
| CAUDAL PROMEDIO= | | | | | 38.814 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 37. Aforo de caudal día domingo (aguas abajo)

| Registros de Medición de Caudales | | | | | |
|--|----------------------------|-------------------|------------------------|---|-----------------------|
| Hora | Efluente | | | | |
| | Agua depurada | | | | |
| | Long. del tramo (m) | Tiempo (s) | Velocidad (m/s) | Área transversal (m²) | Caudal (Lts/s) |
| 7:00am | 18.52 | 43.470 | 0.426 | 0.728 | 263.668 |
| 8:00am | 18.52 | 42.474 | 0.436 | 0.728 | 269.851 |
| 9:00am | 18.52 | 41.568 | 0.446 | 0.728 | 275.732 |
| 10:00am | 18.52 | 41.632 | 0.445 | 0.728 | 275.308 |
| 11:00am | 18.52 | 42.112 | 0.440 | 0.728 | 272.170 |
| CAUDAL PROMEDIO= | | | | | 271.346 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 38. Aforo de caudal día lunes (aguas arriba)

| Registros de Medición de Caudales | | | | | |
|--|----------------------------|-------------------|------------------------|---|-----------------------|
| Hora | Efluente | | | | |
| | Agua depurada | | | | |
| | Long. del tramo (m) | Tiempo (s) | Velocidad (m/s) | Área transversal (m²) | Caudal (Lts/s) |
| 7:00am | 12.8 | 80.522 | 0.159 | 0.283 | 38.230 |
| 8:00am | 12.8 | 77.952 | 0.164 | 0.283 | 39.491 |
| 9:00am | 12.8 | 78.438 | 0.163 | 0.283 | 39.246 |
| 10:00am | 12.8 | 79.672 | 0.161 | 0.283 | 38.638 |
| 11:00am | 12.8 | 80.290 | 0.159 | 0.283 | 38.341 |
| CAUDAL PROMEDIO= | | | | | 38.789 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 39. Aforo de caudal día lunes (aguas abajo)

| Registros de Medición de Caudales | | | | | |
|--|----------------------------|-------------------|------------------------|---|-----------------------|
| Hora | Efluente | | | | |
| | Agua depurada | | | | |
| | Long. del tramo (m) | Tiempo (s) | Velocidad (m/s) | Área transversal (m²) | Caudal (Lts/s) |
| 7:00am | 18.52 | 43.540 | 0.425 | 0.728 | 263.244 |
| 8:00am | 18.52 | 42.368 | 0.437 | 0.728 | 270.526 |
| 9:00am | 18.52 | 41.566 | 0.446 | 0.728 | 275.745 |
| 10:00am | 18.52 | 41.786 | 0.443 | 0.728 | 274.294 |
| 11:00am | 18.52 | 42.320 | 0.438 | 0.728 | 270.833 |
| CAUDAL PROMEDIO= | | | | | 270.928 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 40. Formato de análisis comparativo entre el caudal disponible del efluente y las necesidades hídricas del tabaco

| Día | Caudal promedio diario del efluente (L/s) | Demanda hídrica estimada para tabaco (L/s) | Diferencia (L/s) | ¿Cubre la demanda? (Sí/No) |
|-----------------|--|---|-------------------------|-----------------------------------|
| 1 | | | | |
| 2 | | | | |
| 3 | | | | |
| 4 | | | | |
| 5 | | | | |
| 6 | | | | |
| 7 | | | | |
| 8 | | | | |
| Promedio | | | | |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 41. Formato de verificación del cumplimiento de parámetros fisicoquímicos en muestras del efluente de la STAR de Estelí para reuso agrícola

| Parámetro | Unidad de medida | Valor medido | Rango permitido | Cumple | No Cumple |
|------------------------|-------------------------|---------------------|------------------------|---------------|------------------|
| pH | Unidades de pH | | | | |
| Temperatura | °C | | | | |
| DBO5 | mgO ₂ /L | | | | |
| E-coli | NMP/100mL | | | | |
| CE | dS/m | | | | |
| Calcio | mg/L | | | | |
| CO₃ | mg/L | | | | |
| HCO₃ | mg/L | | | | |
| Cloruro | mg/L | | | | |
| Sodio | mg/L | | | | |
| Nitrógeno | mg/L | | | | |
| Fósforo | mg/L | | | | |
| Potasio | mg/L | | | | |
| Magnesio | mg/L | | | | |

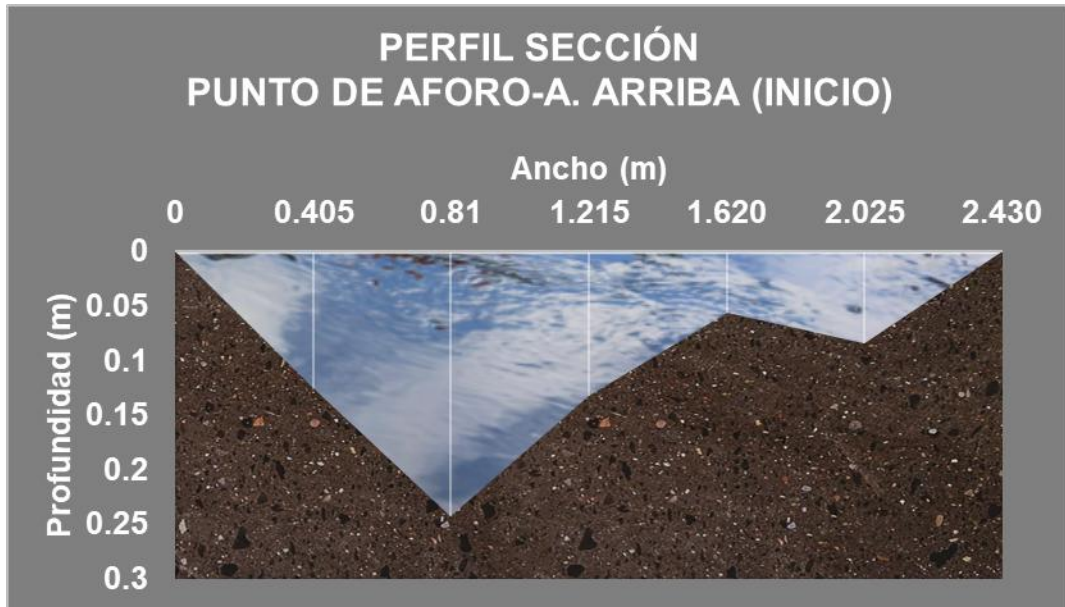
Fuente: Elaboración propia

Tabla 42. Ficha de campo para recolección y toma de muestras de parámetros físico-químicos

| Hora | Velocidad (m/s) | Área trans. (m ²) | Caudal Qi (L/s) | Caudal Qp (L/s) | Volumen total deseado (mL) | Volumen recolectado Vi (mL) |
|---------|-----------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|----------------------------|-----------------------------|
| 7:00am | | | | | | |
| 8:00am | | | | | | |
| 9:00am | | | | | | |
| 10:00am | | | | | | |
| 11:00am | | | | | | |
| 12:00pm | | | | | | |
| 1:00pm | | | | | | |
| 2:00pm | | | | | | |
| 3:00pm | | | | | | |
| 4:00pm | | | | | | |

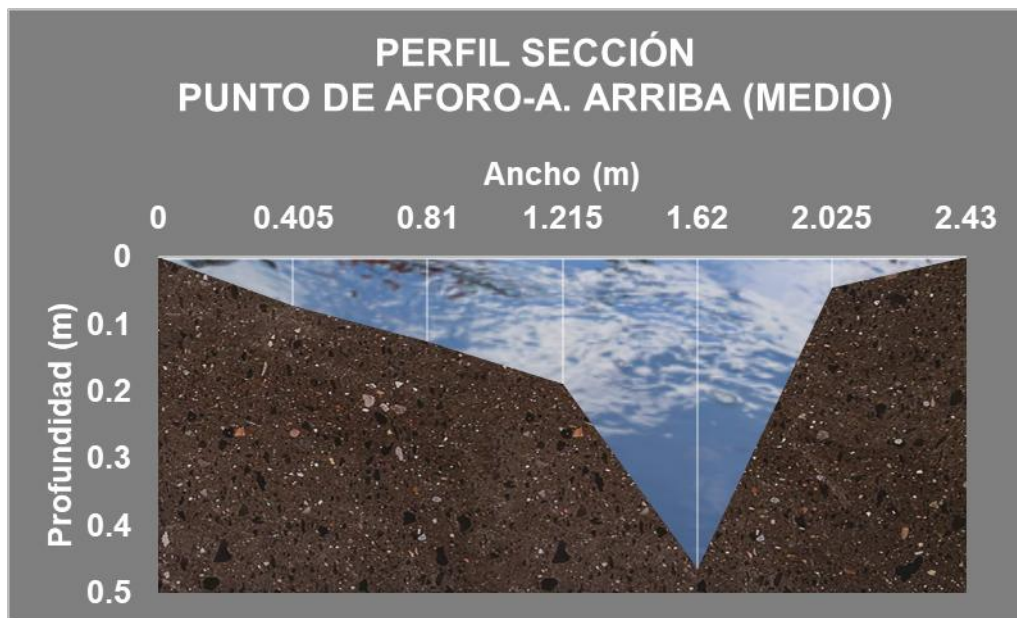
Fuente: Elaboración propia

Figura 28. Perfil de sección transversal 1 del cuerpo receptor (aguas arriba)



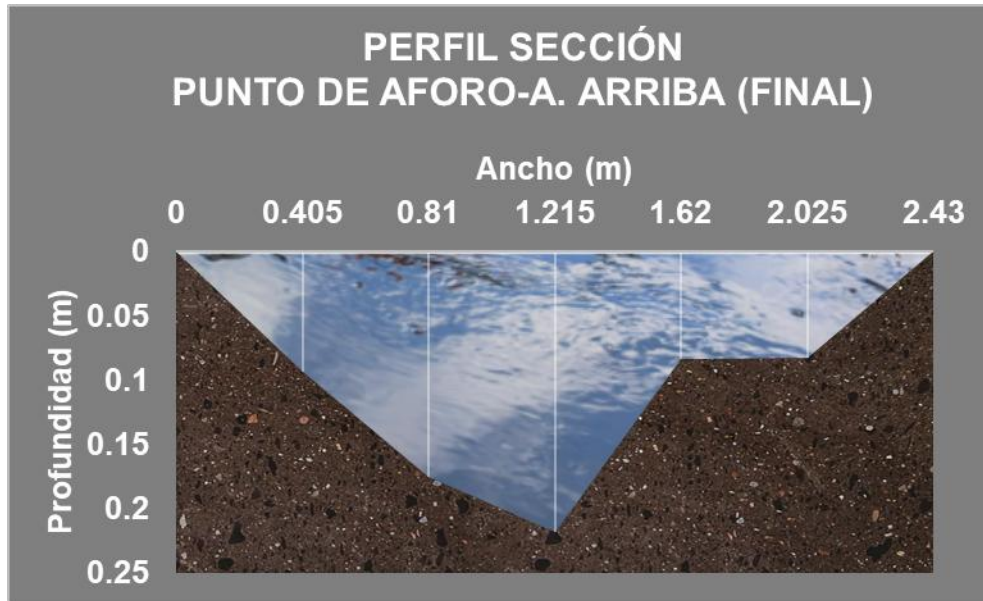
Fuente: Elaboración propia

Figura 29. Perfil de sección transversal 2 del cuerpo receptor (aguas arriba)



Fuente: Elaboración propia

Figura 30. Perfil de sección transversal 3 del cuerpo receptor (aguas arriba)



Fuente: Elaboración propia

Figura 31. Perfil de sección transversal 1 del cuerpo receptor (aguas abajo)



Fuente: Elaboración propia

Figura 32. Perfil de sección transversal 2 del cuerpo receptor (aguas abajo)



Fuente: Elaboración propia

Figura 33. Perfil de sección transversal 3 del cuerpo receptor (aguas abajo)



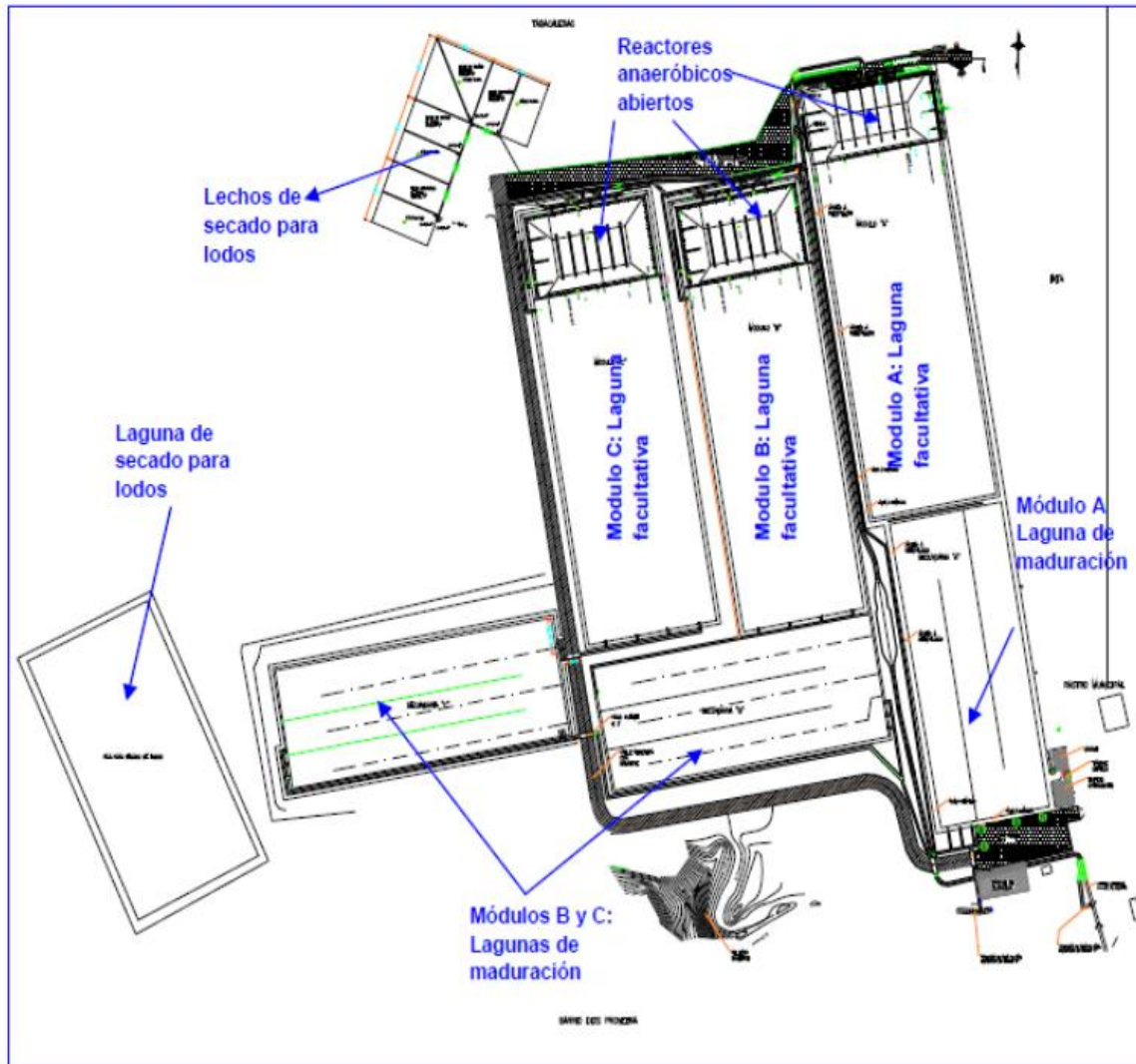
Fuente: Elaboración propia

Figura 34. Implementación del ODS 6 en el progreso mundial



Fuente: ONU, (2015)

Figura 35. Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales (STAR) del municipio de Estelí.



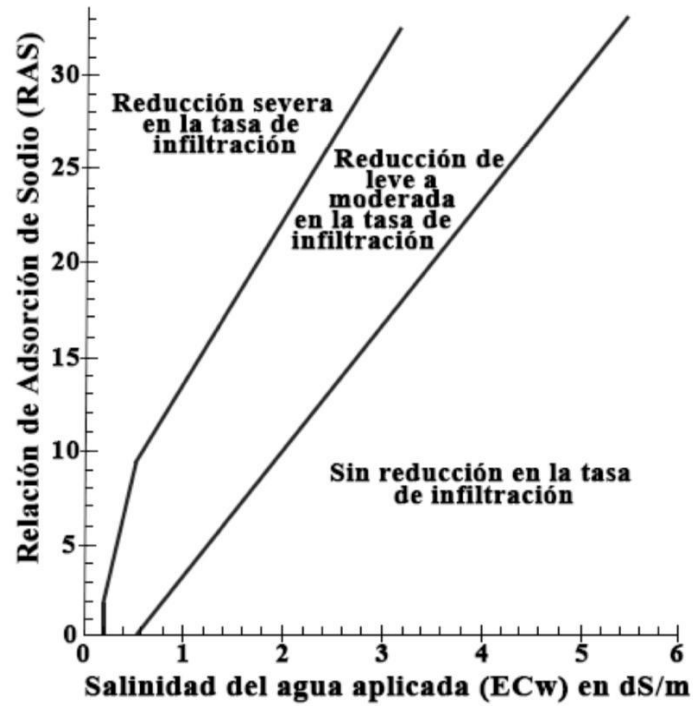
Fuente: Unidad de Gestión Proyecto Integrado Estelí-Ocotal, Programa Regional de reconstrucción para América Central (PRRAC) (2004)

Figura 36. Concentración de Ca^o en función de la CE y de la relación HCO₃/Ca

| | | Salinidad del agua aplicada (EC _w) (ds/m) | | | | | | | | | | | |
|----------------------|------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,5 | 0,7 | 1 | 1,5 | 2 | 3 | 4 | 6 | 8 |
| HCO ₃ /Ca | 0,05 | 13,20 | 13,61 | 13,92 | 14,40 | 14,79 | 15,26 | 15,91 | 16,43 | 17,28 | 17,97 | 19,07 | 19,94 |
| | 0,10 | 8,31 | 8,57 | 8,77 | 9,07 | 9,31 | 9,62 | 10,02 | 10,35 | 10,89 | 11,32 | 12,01 | 12,56 |
| | 0,15 | 6,34 | 6,54 | 6,69 | 6,92 | 7,11 | 7,34 | 7,65 | 7,90 | 8,31 | 8,64 | 9,17 | 9,58 |
| | 0,20 | 5,24 | 5,40 | 5,52 | 5,71 | 5,87 | 6,06 | 6,31 | 6,52 | 6,86 | 7,13 | 7,57 | 7,91 |
| | 0,25 | 4,51 | 4,65 | 4,76 | 4,92 | 5,06 | 5,22 | 5,44 | 5,62 | 5,91 | 6,15 | 6,52 | 6,82 |
| | 0,30 | 4,00 | 4,12 | 4,21 | 4,36 | 4,48 | 4,62 | 4,82 | 4,98 | 5,24 | 5,44 | 5,77 | 6,04 |
| | 0,35 | 3,61 | 3,72 | 3,80 | 3,94 | 4,04 | 4,17 | 4,35 | 4,49 | 4,72 | 4,91 | 5,21 | 5,45 |
| | 0,40 | 3,30 | 3,40 | 3,48 | 3,6 | 3,7 | 3,82 | 3,98 | 4,11 | 4,32 | 4,49 | 4,77 | 4,98 |
| | 0,45 | 3,05 | 3,14 | 3,22 | 3,33 | 3,42 | 3,53 | 3,68 | 3,80 | 4,00 | 4,15 | 4,41 | 4,61 |
| | 0,50 | 2,84 | 2,93 | 3,00 | 3,10 | 3,19 | 3,29 | 3,43 | 3,54 | 3,72 | 3,87 | 4,11 | 4,3 |
| | 0,75 | 2,17 | 2,24 | 2,29 | 2,37 | 2,43 | 2,51 | 2,62 | 2,70 | 2,84 | 2,95 | 3,14 | 3,28 |
| | 1,00 | 1,79 | 1,85 | 1,89 | 1,96 | 2,01 | 2,09 | 2,16 | 2,23 | 2,35 | 2,44 | 2,59 | 2,71 |
| | 1,25 | 1,54 | 1,59 | 1,63 | 1,68 | 1,73 | 1,78 | 1,86 | 1,92 | 2,02 | 2,10 | 2,23 | 2,33 |
| | 1,50 | 1,37 | 1,41 | 1,44 | 1,49 | 1,53 | 1,58 | 1,65 | 1,70 | 1,79 | 1,86 | 1,97 | 2,07 |
| | 1,75 | 1,23 | 1,27 | 1,30 | 1,35 | 1,38 | 1,43 | 1,49 | 1,54 | 1,62 | 1,68 | 1,78 | 1,86 |
| | 2,00 | 1,13 | 1,16 | 1,19 | 1,23 | 1,26 | 1,31 | 1,36 | 1,40 | 1,48 | 1,54 | 1,63 | 1,7 |
| | 2,25 | 1,04 | 1,08 | 1,10 | 1,14 | 1,17 | 1,21 | 1,26 | 1,30 | 1,37 | 1,42 | 1,51 | 1,58 |
| | 2,50 | 0,97 | 1,00 | 1,02 | 1,06 | 1,09 | 1,12 | 1,17 | 1,21 | 1,27 | 1,32 | 1,4 | 1,47 |
| | 3,00 | 0,85 | 0,89 | 0,91 | 0,94 | 0,96 | 1,00 | 1,04 | 1,07 | 1,13 | 1,17 | 1,24 | 1,30 |
| | 3,50 | 0,78 | 0,80 | 0,82 | 0,85 | 0,87 | 0,90 | 0,94 | 0,97 | 1,02 | 1,06 | 1,12 | 1,17 |
| 4,00 | 0,71 | 0,73 | 0,75 | 0,78 | 0,80 | 0,82 | 0,86 | 0,88 | 0,93 | 0,97 | 1,03 | 1,07 | |
| 4,50 | 0,66 | 0,68 | 0,69 | 0,72 | 0,74 | 0,76 | 0,79 | 0,82 | 0,86 | 0,90 | 0,95 | 0,99 | |
| 5,00 | 0,61 | 0,63 | 0,65 | 0,67 | 0,69 | 0,71 | 0,74 | 0,76 | 0,80 | 0,83 | 0,88 | 0,93 | |
| 7,00 | 0,49 | 0,50 | 0,52 | 0,53 | 0,55 | 0,57 | 0,59 | 0,61 | 0,64 | 0,67 | 0,71 | 0,74 | |
| 10 | 0,39 | 0,40 | 0,41 | 0,42 | 0,43 | 0,45 | 0,47 | 0,48 | 0,51 | 0,53 | 0,56 | 0,58 | |
| 20 | 0,24 | 0,25 | 0,26 | 0,26 | 0,27 | 0,28 | 0,29 | 0,30 | 0,32 | 0,33 | 0,35 | 0,37 | |
| 30 | 0,18 | 0,19 | 0,20 | 0,20 | 0,21 | 0,21 | 0,22 | 0,23 | 0,24 | 0,25 | 0,27 | 0,28 | |

Fuente: FAO, (1985)

Figura 37. Reducción de la infiltración en función de RAS° y de la CE del agua de riego



Fuente: FAO, (1985)

Figura 38. Descarga del efluente de la STAR de Estelí



Fuente: Propia

Figura 39. Estado actual del cuerpo receptor del efluente de la STAR de Estelí



Fuente: Propia

Figura 40. Quebrada “La Limonosa” Estelí



Fuente: Propia

Figura 41. Levantamiento de sección transversal en el tramo aguas arriba



Fuente: Propia

Figura 42. Levantamiento de sección transversal en el tramo aguas abajo



Fuente: Propia

Figura 43. Menciones de profundidades de flujo



Fuente: Propia

Figura 44. Objeto flotante medidor de velocidad de flujo según FAO, (2006)



Fuente: Propia

Figura 45. Recolección de submuestras del efluente en el punto de muestreo



Fuente: Propia

Figura 46. Integración de submuestras para conformar la muestra compuesta



Fuente: Propia

Figura 47. Envasado y refrigeración del efluente para transporte al laboratorio



Fuente: Propia

Figura 48. Aforo para determinar el volumen proporcional de submuestras



Fuente: Propia

Figura 49. Registro de temperatura in situ



Fuente: Propia

Figura 50. Primer informe de ensayos de agua residual depurada proveniente de la STAR del municipio de Estelí



INFORME DE ENSAYOS DE AGUAS RESIDUALES

| NOMBRE DEL CLIENTE | | DIRECCION DEL CLIENTE | | TELEFONO |
|--|---|-----------------------|--|----------------|
| Ileana Sarahí López | | PTAR Estelí | | NR |
| ATENCIÓN | | CARGO | EMAIL | CELULAR |
| Ileana Sarahí López | | Estudiante | ileanal23@gmail.com | 5739-0553 |
| DATOS DE LA MUESTRA | | | CONTROL DEL LABORATORIO PARA EL PROCESAMIENTO DE LA MUESTRA | |
| Fecha y Hora de recolección | 21/08/2025; 07:00 a.m. | | Ingreso de muestra | 22/08/2025 |
| Fuente | Descarga Efluente STAR ,Estelí | | Inicio de análisis | 22/08/2025 |
| Tipo de muestra/preservación/Estado envase | Agua residual puntual/Térmica/Aceptable | | Finalización de análisis | 07/11/2025 |
| Ubicación de la fuente | STAR Estelí Quebrada Limonosa | | Emisión del informe de resultados | 07/11/2025 |
| Coordenadas | NR | | No. Cadena de custodia | 7201 |
| Recolectada por | El cliente | | Código de muestra | LA-1609-0612 |
| Supervisor en campo | Oliver J. Rivera Gutiérrez | | Muestra No. | Una (1) |
| METODO SM // EPA | ENSAYO REALIZADO | UNIDAD | RESULTADOS | NTON 05 027 05 |
| 4500-B | Potencial de Hidrógeno | pH | 6.18 | NE |
| 2320-B | Bicarbonato | mg/L | 3.45 | NE |
| 2320-B | Carbonato | mg/L | <0.40 | NE |
| 5210-B | DBO | mg/L | 61.32 | 200 |
| 2510-B | Conductividad Eléctrica | µS/cm | 512.00 | 200 |
| 4500-D | Cloruro | mg/L | 37.2 | NE |
| 3500-B | calcio | mg/L | 66.10 | NE |
| ISE-121 | Sodio | mg/L | 40.25 | NE |
| 4500-B | Nitrógeno | mg/L | 32.90 | 15 |
| 8149 | Magnesio | mg/L | 40.12 | NE |
| 4500-C | Fósforo | mg/L | 1.95 | 5 |
| 3500-C | Potasio | mg/L | 6.55 | NE |
| 9221-F | E-coli | NMP/100 mL | 1.6 X10^4 | NE |

LEYENDA DE REPORTE DE RESULTADOS: Se reporta por parámetro de acuerdo a la Unidad que se indica en la columna y línea respectiva.
 Abreviaturas y símbolos: ≤ menor o igual al Límite de Detección que se especifica por parámetro.
 Metodos, Normas y/o Decreto empleados: SM = Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater 24 RD 2023
 EPA = Environmental Protection Agency, ¹NTON 05 027 05 Norma técnica Obligatorio Nicaraguense para regular los sistemas de tratamientos de aguas residuales y su reuso.
 OBSERVACIONES: La muestra fue recolectada, custodiada e ingresada por el cliente a la oficina de atención a cliente, el cual proporciona los datos de la muestra reportada en el presente informe, para la realización de los ensayos a ser ejecutados en las instalaciones de los laboratorios ambientales PIENSA-UNI. El Laboratorio no se hace responsable de la información suministrada por el cliente que pueda afectar a la validez de los resultados.
 Declaramos que este informe de resultados será de uso exclusivo del cliente. El laboratorio garantiza la confidencialidad e imparcialidad del informe. Los resultados emitidos se relacionan únicamente con los ítems de ensayo. Una vez recibido los informes de ensayos, la validez de su reclamo es de 28 días calendario.

MGPD Silvano Cruz Sánchez
 Responsable de Programa UNI-PIENSA

☎ Teléfono: (505) 2270 5613

.....Fin del Informe

Recinto Universitario Simón Bolívar
 Avenida Universitaria,
 Managua, Nicaragua.
 Apdo: 5595

Pag. 1/1

✉ atencion.cliente@piensa.uni.edu.ni
www.piensa.uni.edu.ni

Fuente: Laboratorios PIENSA-UNI, (2025)

Figura 51. Segundo informe de ensayos de agua residual depurada proveniente de la STAR del municipio de Estelí



INFORME DE ENSAYOS DE AGUAS RESIDUALES

| NOMBRE DEL CLIENTE | | DIRECCION DEL CLIENTE | | TELEFONO |
|--|---|-----------------------|--|----------------|
| Ileana Sarahí López | | PTAR Estelí | | NR |
| ATENCIÓN | | CARGO | EMAIL | CELULAR |
| Ileana Sarahí López | | Estudiante | ileanaloz23@gmail.com | 5739-0553 |
| DATOS DE LA MUESTRA | | | CONTROL DEL LABORATORIO PARA EL PROCESAMIENTO DE LA MUESTRA | |
| Fecha y Hora de recolección | 07/09/2025; 07:00 a.m. | | Ingreso de muestra | 08/09/2025 |
| Fuente | Descarga Efluente STAR ,Estelí | | Inicio de análisis | 08/09/2025 |
| Tipo de muestra/preservación/Estado envase | Agua residual puntual/Térmica/Aceptable | | Finalización de análisis | 23/10/2025 |
| Ubicación de la fuente | STAR Estelí Quebrada Limonosa | | Emisión del informe de resultados | 23/10/2025 |
| Coordenadas | NR | | No. Cadena de custodia | 7208 |
| Recolectada por | El cliente | | Código de muestra | LA-2509-0694 |
| Supervisor en campo | Oliver J. Rivera Gutiérrez | | Muestra No. | Una (1) |
| Rango o valor máximo permisible recomendado | | | | |
| METODO SM // EPA | ENSAYO REALIZADO | UNIDAD | RESULTADOS | NTON 05 027 05 |
| 4500-B | Potencial de Hidrógeno | pH | 6.03 | NE |
| 2320-B | Bicarbonato | mg/L | 3.14 | NE |
| 2320-B | Carbonato | mg/L | <0.40 | NE |
| 5210-B | DBO | mg/L | 57.19 | 200 |
| 2510-B | Conductividad Eléctrica | µS/cm | 494.00 | 200 |
| 4500-D | Cloruro | mg/L | 35.00 | NE |
| 3500-B | calcio | mg/L | 63.73 | NE |
| ISE-121 | Sodio | mg/L | 37.75 | NE |
| 4500-B | Nitrógeno | mg/L | 29.31 | 15 |
| 8149 | Magnesio | mg/L | 38.62 | NE |
| 4500-C | Fósforo | mg/L | 1.85 | 5 |
| 3500-C | Potasio | mg/L | 6.30 | NE |
| 9221-F | E-coli | NMP/100 mL | 1.1x10^4 | NE |

LEYENDA DE REPORTE DE RESULTADOS: Se reporta por parámetro de acuerdo a la Unidad que se indica en la columna y línea respectiva. Abreviaturas y símbolos: ≤ menor o igual al Límite de Detección que se especifica por parámetro. Métodos, Normas y/o Decreto empleados: SM = Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater 24 RD 2023 EPA = Environmental Protection Agency, ¹NTON 05 027 05 Norma técnica Obligatorio Nicaraguense para regular los sistemas de tratamientos de aguas residuales y su reuso. OBSERVACIONES: La muestra fue recolectada, custodiada e ingresada por el cliente a la oficina de atención a cliente, el cual proporciona los datos de la muestra reportada en el presente informe, para la realización de los ensayos a ser ejecutados en las instalaciones de los laboratorios ambientales PIENSA-UNI. El Laboratorio no se hace responsable de la información suministrada por el cliente que pueda afectar a la validez de los resultados. Declaramos que este informe de resultados será de uso exclusivo del cliente. El laboratorio garantiza la confidencialidad e imparcialidad del informe. Los resultados emitidos se relacionan únicamente con los ítems de ensayo. Una vez recibido los informes de ensayos, la validez de su reclamo es de 28 días calendario.

MGPD Silvano Cruz Sánchez
Responsable de Programa UNI-PIENSA

Teléfono: (505) 2270 5613

.....Fin del Informe

Recinto Universitario Simón Bolívar
Avenida Universitaria,
Managua, Nicaragua.
Apdo: 5595

Pag. 1/1

atencion.cliente@piensa.uni.edu.ni
www.piensa.uni.edu.ni

Fuente: Laboratorios PIENSA-UNI, (2025)

Figura 52. Tercer informe de ensayos de agua residual depurada proveniente de la STAR del municipio de Estelí



INFORME DE ENSAYOS DE AGUAS RESIDUALES

| NOMBRE DEL CLIENTE | | DIRECCION DEL CLIENTE | | TELEFONO |
|--|---|-----------------------|--|----------------|
| Ileana Sarahí López | | PTAR Estelí | | NR |
| ATENCIÓN | | CARGO | EMAIL | CELULAR |
| Ileana Sarahí López | | Estudiante | ileanalo23@gmail.com | 5739-0553 |
| DATOS DE LA MUESTRA | | | CONTROL DEL LABORATORIO PARA EL PROCESAMIENTO DE LA MUESTRA | |
| Fecha y Hora de recolección | 21/09/2025; 07:00 a.m. | | Ingreso de muestra | 22/09/2025 |
| Fuente | Descarga Efluente STAR ,Estelí | | Inicio de análisis | 22/09/2025 |
| Tipo de muestra/preservación/Estado envase | Agua residual puntual/Térmica/Aceptable | | Finalización de análisis | 05/11/2025 |
| Ubicación de la fuente | STAR Estelí Quebrada Limonosa | | Emisión del informe de resultados | 05/11/2025 |
| Coordenadas | NR | | No. Cadena de custodia | 7214 |
| Recolectada por | El cliente | | Código de muestra | LA-2510-0706 |
| Supervisor en campo | Oliver J. Rivera Gutiérrez | | Muestra No. | Una (1) |
| METODO SM // EPA | ENSAYO REALIZADO | UNIDAD | RESULTADOS | NTON 05 027 05 |
| 4500-B | Potencial de Hidrógeno | pH | 6.27 | NE |
| 2320-B | Bicarbonato | mg/L | 3.01 | NE |
| 2320-B | Carbonato | mg/L | <0.40 | NE |
| 5210-B | DBO | mg/L | 63.85 | 200 |
| 2510-B | Conductividad Eléctrica | µS/cm | 528.40 | 200 |
| 4500-D | Cloruro | mg/L | 38.12 | NE |
| 3500-B | calcio | mg/L | 68.44 | NE |
| ISE-121 | Sodio | mg/L | 42.10 | NE |
| 4500-B | Nitrógeno | mg/L | 34.55 | 15 |
| 8149 | Magnesio | mg/L | 42.80 | NE |
| 4500-C | Fósforo | mg/L | 2.10 | 5 |
| 3500-C | Potasio | mg/L | 6.90 | NE |
| 9221-F | E-coli | NMP/100 mL | 1.6 X10 ⁴ | NE |

LEYENDA DE REPORTE DE RESULTADOS: Se reporta por parámetro de acuerdo a la Unidad que se indica en la columna y línea respectiva.

Abreviaturas y símbolos: ≤ menor o igual al Límite de Detección que se especifica por parámetro.

Metodos, Normas y/o Decreto empleados: SM = Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater 24 RD 2023

EPA = Environmental Protection Agency, ¹NTON 05 027 05 Norma técnica Obligatorio Nicaraguense para regular los sistemas de tratamientos de aguas residuales y su reuso.

OBSERVACIONES: La muestra fue recolectada, custodiada e ingresada por el cliente a la oficina de atención a cliente, el cual proporciona los datos de la muestra reportada en el presente informe, para la realización de los ensayos a ser ejecutados en las instalaciones de los laboratorios ambientales PIENSA-UNI. El Laboratorio no se hace responsable de la información suministrada por el cliente que pueda afectar a la validez de los resultados.

Declaramos que este informe de resultados será de uso exclusivo del cliente. El laboratorio garantiza la confidencialidad e imparcialidad del informe. Los resultados emitidos se relacionan únicamente con los ítems de ensayo. Una vez recibido los informes de ensayos, la validez de su reclamo es de 28 días calendario.

MGPD Silvano Cruz Sánchez
Responsable de Programa UNI-PIENSA

Teléfono: (505) 2270 5613

.....Fin del Informe

Recinto Universitario Simón Bolívar
Avenida Universitaria,
Managua, Nicaragua.
Apdo: 5595

Pag. 1/1

atencion.cliente@piensa.uni.edu.ni
www.piensa.uni.edu.ni

Fuente: Laboratorios PIENSA-UNI, (2025)

GLOSARIO DE NOMENCLATURAS DE ECUACIONES

-CE_w: Conductividad eléctrica del agua de riego, expresada en decisiemens por metro (dS/m). Es un indicador indirecto del contenido total de sales disueltas en el agua.

-Na⁺: Concentración de sodio en el agua, expresada en miliequivalentes por litro (meq/L). Influye directamente en el riesgo de sodicidad del suelo.

-Ca²⁺: Concentración de calcio en el agua, expresada en miliequivalentes por litro (meq/L). Contribuye a la estabilidad estructural del suelo y contrarresta los efectos del sodio.

-Mg²⁺: Concentración de magnesio en el agua, expresada en miliequivalentes por litro (meq/L). Junto con el calcio, participa en la evaluación del equilibrio catiónico del agua.

-HCO₃⁻: Concentración de bicarbonatos en el agua, expresada en miliequivalentes por litro (meq/L). Interviene en procesos de precipitación de calcio y magnesio, afectando el riesgo de alcalinidad.

-CO₃²⁻: Concentración de carbonatos en el agua, expresada en miliequivalentes por litro (meq/L). En este estudio se considera despreciable debido a valores reportados menores al límite de detección.

-RAS (Relación de Adsorción de Sodio): Índice de sodicidad que considera la reducción efectiva de calcio y magnesio debido a la presencia de bicarbonatos, calculado mediante:

$$RAS^{\circ} = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca + Mg}{2}}}$$

Proporciona una estimación más realista del riesgo de sodicidad en aguas con alto contenido de bicarbonatos.

-RAS° (RAS corregido por CEw): Valor del RAS ajustado considerando la conductividad eléctrica del agua, empleado en diagramas de clasificación para evaluar el efecto combinado de salinidad y sodicidad.

-RAS_{mod} (RAS modificado): Índice de sodicidad que considera la reducción efectiva de calcio y magnesio debido a la presencia de bicarbonatos, calculado mediante:

$$\text{RAS}^\circ = \frac{\text{Na}}{\sqrt{\frac{\text{Ca} + \text{Mg}}{2}}}$$

Proporciona una estimación más realista del riesgo de sodicidad en aguas con alto contenido de bicarbonatos.

-Ca' (Calcio corregido): Concentración efectiva de calcio luego de considerar su precipitación potencial por bicarbonatos, expresada en meq/L.

-Mg' (Magnesio corregido): Concentración efectiva de magnesio luego de considerar su precipitación potencial por bicarbonatos, expresada en meq/L.

-Ca (HCO₃)₂: Fracción de bicarbonato asociada al calcio, asumida como la mitad del bicarbonato total en ausencia de carbonatos.

-Mg (HCO₃)₂: Fracción de bicarbonato asociada al magnesio, asumida como la mitad del bicarbonato total.

-meq/L: Miliequivalentes por litro. Unidad utilizada para expresar concentraciones iónicas en estudios de calidad de agua.

-dS/m: Decisiemens por metro. Unidad de medida de la conductividad eléctrica del agua.