

Oxidación Anaerobia del Amoniacó en el Tratamiento de las Aguas Residuales  
Domésticas a Gran Escala Aplicado a la planta de Tratamiento de Agua Residual de la  
Ciudad de Tunja

Yeimy Tatiana Osorio Churque

Marcos Duván Solano Martínez

Universidad de Boyacá

Facultad de Ciencias e Ingeniería

Ingeniería Ambiental

Tunja

2021

Oxidación Anaerobia del Amoniac en el Tratamiento de las Aguas Residuales  
Domésticas a Gran Escala Aplicado a la planta de Tratamiento de Agua Residual de la  
Ciudad de Tunja

Yeimy Tatiana Osorio Churque

Marcos Duván Solano Martínez

Trabajo de Grado para optar al título de Ingenieros Ambientales

Asesor

Jaime Diaz Gómez

Ingeniero ambiental

Universidad de Boyacá

Facultad de Ciencias e Ingeniería

Ingeniería Ambiental

Tunja

2021

Oxidación anaerobia del amoniaco

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

Firma presidente del Jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Tunja, 4 de noviembre del 2021

## Oxidación anaerobia del amoníaco

“Únicamente el graduando es responsable de las ideas expuestas en el presente trabajo”  
(Universidad de Boyacá. Acuerdo 958 del 30 de marzo de 2017, Artículo décimo primero).

## Oxidación anaerobia del amoníaco

Este proyecto de grado es un homenaje a nuestros padres por brindarnos la oportunidad de formarnos como profesionales íntegros, dentro de una institución de educación superior, por permitirnos comenzar el camino hacia la materialización de los sueños y la búsqueda de nuestros más profundos anhelos, ya que su apoyo ha sido el pilar fundamental para lograr culminar satisfactoriamente uno de tantos escalones para lograr el éxito profesional y la integridad moral, igualmente este proyecto está dedicado a cada una de las personas que de una u otra manera aportaron con sus conocimientos a la formulación y desarrollo del presente proyecto.

Lo efímero del tiempo se desvanece cada vez que la vida se fundamenta en el conocimiento y la felicidad. De igual manera agradecemos a nuestros amigos y familiares quienes estuvieron junto a nosotros en este proceso de formación académica y profesional.

## Oxidación anaerobia del amoniaco

### **Agradecimientos**

Va dirigido a nuestros padres, hermanos, amigos y demás familiares quienes nos han brindado su apoyo incondicional durante estos años, con el objetivo de formarnos como profesionales íntegros, útiles dentro del desarrollo social y profesional.

Agradecemos a nuestros asesores, el ingeniero Jaime Diaz Gómez Docente de la universidad de Boyacá y el MSc. Lic. Gabriel Ricardo Cifuentes Osorio por brindarnos su experiencia y conocimiento para el desarrollo oportuno del proyecto.

## Oxidación anaerobia del amoniaco

### Contenido

|   |    |
|---|----|
| Introducción.....   | 17 |
| 1. Diagnóstico de la aplicación del proceso anammox en el tratamiento de las aguas residuales a gran escala.....              | 18 |
| 1.1. Conceptualización y descripción del proceso de oxidación anaerobia del amoniaco en aguas residuales domésticas.....      | 18 |
| Las bacterias Anammox.....  | 19 |
| 1.2. Caracterización del proceso anammox frente a procesos convencionales de tratamiento de aguas residuales. ....            | 21 |
| 1.3. Aplicaciones del proceso Anammox dentro un sistema de tratamiento.....   | 21 |
| 2. Caracterización del agua residual doméstica de la planta de tratamiento de agua residual de Tunja-Boyacá.....              | 24 |
| 2.1 Descripción de la PTAR de la ciudad de Tunja .....  | 24 |
| 2.2. Caracterización del agua residual de la ciudad de Tunja .....  | 25 |
| 3. Formulación e implementación del modelo del proceso Anammox .....  | 27 |
| 3.1 Modelo del proceso de la oxidación anaerobia del amoniaco en aguas residuales domésticas mediante el simulador GPS-X..... | 27 |
| 3.1.1. Planteamiento del modelo en condiciones operativas reales .....  | 29 |
| 3.1.1. Planteamiento del modelo en condiciones operativas ideales .....   | 30 |
| 3.2. Análisis de resultados de la modelación del proceso Anammox .....  | 31 |
| 3.2.1. Análisis de resultados basados en las condiciones operativas de Tunja.....   | 31 |
| 3.2.1.4. Tanque Anammox.....  | 35 |
| 3.2.1.5. Centrifuga .....   | 37 |

## Oxidación anaerobia del amoniac

|  |      |
|--|------|
| 3.2.1.6. Efluente.....   | 3838 |
| 3.2.2 Análisis de resultados para un tiempo de retención de 9 horas .....  | 39   |
| 3.2.2.2 Tanque de aireación (nitrificación).....   | 40   |
| 3.2.2.3 Tanque Anammox.....  | 42   |
| 3.2.2.4 Centrifuga .....   | 45   |
| 3.2.2.5 Lodos .....  | 46   |
| 3.2.2.6. Efluente.....   | 47   |
| 3.3. Eficiencia del proceso Anammox .....  | 49   |
| 3.3.1. Eficiencia del proceso anammox basados en los resultados del modelo de las condiciones operativas reales de Tunja ..... | 49   |
| 3.3.1.2 Eficiencia de remoción de la DQO .....   | 49   |
| 3.3.1.3. Eficiencia de remoción del amoniac evaluada en el efluente .....  | 50   |
| 3.3.1.4 Eficiencia de remoción de DBO y DQO .....  | 50   |
| 3.3.2. Eficiencia del proceso anammox basados en los resultados del modelo con tiempo hidráulico de retención de 9 horas.....  | 51   |
| 3.3.2.1 Eficiencia de remoción del amoniac en el tanque anammox.....   | 51   |
| 3.3.2.2 Eficiencia de remoción de la DBO y DQO.....  | 51   |
| 3.3.2.3. Eficiencia de remoción del amoniac evaluada en el efluente .....  | 52   |
| 3.3.2.4 Eficiencia de remoción de la DBO y DQO.....  | 52   |
| Conclusiones.....  | 55   |
| Recomendaciones .....  | 57   |
| Referencias.....   | 58   |
| Anexos .....   | 61   |

## Oxidación anaerobia del amoníaco

**Lista de tablas**

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1. Aplicación del proceso anammox en PTAR'S a gran escala.....                                | 23 |
| Tabla 2 Medición de los parámetros medidos en campo de agua residual cruda de Tunja.                | 26 |
| Tabla 3. Parámetros fisicoquímicos del agua residual.....   | 26 |
| Tabla 4. Caracterización del afluente .....   | 31 |
| Tabla 5. Resultado de las concentraciones obtenidas dentro del digestor anaerobio .....             | 32 |
| Tabla 6. Resultados obtenidos dentro del tanque de nitrificación .....                              | 33 |
| Tabla 7. Resultados de la simulación en el tanque anammox .....                                     | 35 |
| Tabla 8.Resultado de las concentraciones obtenidas dentro del tambor de pantallas múltiples .....   | 37 |
| Tabla 9. Resultados de las concentraciones obtenidas del efluente del sistema .....                 | 38 |
| Tabla 10. Resultado de las concentraciones obtenidas dentro del digestor anaerobio .....            | 39 |
| Tabla 11. Resultados obtenidos dentro del tanque de nitrificación .....                             | 40 |
| Tabla 12. Resultados de la simulación en el tanque anammox .....                                    | 42 |
| Tabla 13. Resultado de las concentraciones obtenidas dentro del tambor de pantallas múltiples ..... | 45 |
| Tabla 14. Resultados obtenidos dentro de los lodos de exceso .....                                  | 46 |
| Tabla 15. Resultados de las concentraciones obtenidas de la Biomasa.....                            | 47 |
| Tabla 16. Resultados de las concentraciones obtenidas del efluente del sistema.....                 | 48 |

### Lista de Figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Ciclo del nitrógeno .....   | 19 |
| Figura 2. Microfotografía electrónica de Estructura celular.....                              | 20 |
| Figura 3. Muestra de lodos granulares Anammox.....  | 20 |
| Figura 4. Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (VEOLIA) Tunja – Boyacá.....              | 24 |
| Figura 5. Consejero del afluente .....  | 27 |
| Figura 6. Esquema del proceso Anammox modelado mediante GPS-X.....                            | 29 |
| Figura 7. Afluente del sistema .....  | 31 |
| Figura 8. Tanque Digestor Anaerobio .....   | 32 |
| Figura 9. Tanque de Nitrificación.....  | 33 |
| Figura 10. Tanque Anammox .....   | 35 |
| Figura 11. Concentración de gas di nitrógeno soluble en el tanque Anammox .....               | 36 |
| Figura 12. Concentración de bacterias anammo .....  | 36 |
| Figura 13. Pantalla múltiple.....   | 37 |
| Figura 14. Efluente del sistema.....  | 38 |
| Figura 15. Concentración de nitrógeno amoniacal en el efluente.....                           | 39 |
| Figura 16. Tanque Digestor Anaerobio .....  | 39 |
| Figura 17. Tanque de Nitrificación.....   | 40 |
| Figura 18. Concentración de nitrógeno amoniacal y nitritos en el tanque de Nitrificación..... | 42 |
| Figura 19. Tanque Anammox .....   | 42 |
| Figura 20. Concentración de nitrógeno amoniacal en el tanque Anammox .....                    | 43 |
| Figura 21. Concentración de nitritos y nitratos en el tanque Anammox .....                    | 44 |
| Figura 22. Gas di nitrógeno soluble en el tanque anammox.....                                 | 44 |
| Figura 23. Pantalla múltiple.....   | 45 |
| Figura 24. Disposición de lodos .....   | 46 |

## Oxidación anaerobia del amoníaco

|   |                                      |
|---|--------------------------------------|
| Figura 25. Concentración de biomasa Anammox.....                                    | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
| Figura 26. Efluente del sistema.....  | 47                                   |
| Figura 27. Eficiencias de remoción en los constituyentes en el tanque anammox ..... | 50                                   |
| Figura 28. Eficiencias de remoción en los constituyentes en el tanque anammox ..... | 51                                   |
| Figura 29. Eficiencias de remoción en los constituyentes en el tanque anammox ..... | 52                                   |
| Figura 30. Eficiencias de remoción en los constituyentes en el efluente.....        | 53                                   |

### Glosario

**Agua residual:** las aguas residuales corresponden a todas aquellas afectadas directamente por actividad antropogénica mediante residuos líquidos de origen doméstico o industrial. (READCIVIL, 2019).

**Amonio:** el amoníaco es un nutriente que contiene nitrógeno e hidrógeno. Su fórmula química es  $\text{NH}_3$  en el estado no ionizado y  $\text{NH}_4^+$  en forma ionizada. El amoníaco total es la suma de ambos  $\text{NH}_3$  y  $\text{NH}_4^+$ . El amoníaco total es lo que se mide analíticamente en agua (Kun & Kearney, 1974).

**Bacteria:** las bacterias son organismos procariotas unicelulares, que se encuentran en casi todas las partes de la Tierra. Son vitales para los ecosistemas del planeta. Algunas especies pueden vivir en condiciones realmente extremas de temperatura y presión (Natural Human Genoma research institute).

**Desnitrificación:** la desnitrificación es la reducción de nitratos o nitritos convirtiéndolos en óxidos de nitrógeno, amoníaco y nitrógeno libre mediante determinados microorganismos. (GRAF, 2018).

**Eficiencia:** del latín eficiencia, acción, fuerza, virtud de producir. Criterio económico que revela la capacidad administrativa de producir el máximo resultado con el mínimo de recurso, energía y tiempo, por lo que es la óptima utilización de los recursos disponibles para la obtención de resultados deseados (Rojas, Jamines & Valencia, 2017).

**Efluentes:** derivación de un curso de agua principal o de un lago. Agua residual u otro líquido, parcial o completamente tratado o en su estado natural que, fluye de un depósito, estanque, planta de tratamiento o planta industrial (aguamarket, 2019).

**Eutrofización:** la eutrofización se refiere a la concentración excesiva de nutrientes inorgánicos procedentes de actividades humanas, principalmente Nitrógeno (N) y Fósforo (P),

## Oxidación anaerobia del amoníaco

en un cuerpo de agua superficial, produciendo una proliferación descontrolada de algas Fito planctónicas y provocando efectos adversos en las masas de agua afectadas y los procesos biológicos desarrollados (Zarza, 2019).

**Lodos:** el tratamiento del agua residual trae siempre como consecuencia la formación de lodos residuales, que son subproductos indeseables difíciles de tratar y que implican un costo extra en su manejo y disposición (García, 2006).

**Metabolismo:** conjunto de reacciones químicas que tiene lugar en la célula, y tiene 3 funciones específicas: obtener energía química del entorno, almacenarla, para utilizar luego en diferentes funciones celulares, convertir los nutrientes exógenos en unidades precursoras de los componentes macromoleculares de la célula bacteriana, por último, formar y degradar moléculas necesarias para funciones celulares específicas, como por ejemplo, movilidad y captación de nutrientes (Varela & Grotiuz, 2008).

**Nitrificación:** la nitrificación es el paso en el ciclo del nitrógeno que vincula la oxidación del amoníaco (producido por la degradación de la materia orgánica) con la pérdida de nitrógeno fijo en forma de gas dinitrógeno. Lo realizan algunos grupos diferentes de microorganismos, incluidas las bacterias oxidantes del amoníaco, las arqueas oxidantes del amoníaco y las bacterias oxidantes del nitrito. Estos microbios son todos aerobios y son predominantemente autótrofos. (The Indian Nitrogen Assessment, 2017).

**Oxidación:** la oxidación como tal se refiere al proceso químico que implica la pérdida de electrones por parte de una molécula, átomo o ion. Cuando esto ocurre, decimos que la sustancia ha aumentado su estado de oxidación

**Proceso:** un proceso es comprendido como todo desarrollo sistemático que conlleva una serie de pasos ordenados u organizados, que se efectúan o suceden de forma alternativa o simultánea, los cuales se encuentran estrechamente relacionados entre sí y cuyo propósito es llegar a un resultado preciso (Salzar, 2019).

## Oxidación anaerobia del amoníaco

***Temperatura:*** la temperatura está relacionada con la sensación que experimentamos al tocar ciertos objetos. Esta sensación nos permite clasificarlos en objetos fríos y objetos calientes, las unidades de medida de temperatura son los grados Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ), los grados Fahrenheit ( $^{\circ}\text{F}$ ) y los grados Kelvin (K). El cero absoluto (0 K) corresponde a  $-273,15^{\circ}\text{C}$ .

## Oxidación anaerobia del amoníaco

### Resumen

Osorio Churque, Yeimy Taiana & Solano Martínez, Marcos Duván

Oxidación anaerobia del amoníaco en el tratamiento de las aguas residuales domésticas a gran escala aplicado a la planta de tratamiento de agua residual de la ciudad de Tunja / Yeimy Tatiana Osorio Churque, Marcos Duván Solano Martínez. - - Tunja : Universidad de Boyacá, Facultad de Ciencias e ingeniería, 2021.

79 p. : il. + 1 CD ROM. - - (Trabajo de Grado UB, Ingeniería Ambiental; n° )

Trabajo de Grado (Ingenieros Ambientales). - - Universidad de Boyacá, 2021.

El presente trabajo recopila información acerca del concepto de la oxidación anaerobia del amoníaco (anammox) dentro del tratamiento de las aguas residuales domésticas con altas concentraciones de amoníaco y diversas aplicaciones dentro del tratamiento, presentando datos cuantitativos respecto a los porcentajes de eficiencia en la remoción del nitrógeno amoniacal y relación costo-beneficio por su aplicación, ya que es una tecnología sostenible.

Como escenario de implementación de dicho proceso se establece las aguas residuales domésticas de la ciudad de Tunja-Boyacá por su potencial aplicación, ya que dentro de su caracterización se presenta un contenido de nitrógeno amoniacal de 20 mgN/l. La contextualización del proceso en dicho escenario se realiza por medio de un software de procesos biológicos GPS-X el cual permite determinar la viabilidad de la aplicación del proceso anammox en el tratamiento de las aguas residuales domésticas de la ciudad de Tunja, el cual se evaluará bajo condiciones operativas reales (dimensionamiento actual) y condiciones operativas ideales (dimensionamiento para obtener un THR de 9 horas).

El proceso anammox reduce el consumo de energía en sistemas de aireación, emisiones gases de efecto invernadero y producción de lodos, por lo tanto, se determinó por medio de una revisión bibliográfica que la eficiencia de remoción en el nitrógeno amoniacal es de alrededor del 83%, explicado por medio de balances de oxidación-reducción, siendo base para emplear una

## Oxidación anaerobia del amoniaco

investigación cuasiexperimental en la implementación de un modelo matemático para la simulación de dicho proceso en el tratamiento de las aguas residuales de la ciudad de Tunja, evaluando el rendimiento de la oxidación del amoniaco.

La implementación del modelo permite aplicar el concepto y funcionamiento del proceso descrito en la bibliografía y con ello evaluar la remoción de contaminantes al tratar el agua cruda de la ciudad de Tunja, teniendo en cuenta las concentraciones de nitrógeno amoniacal y carga orgánica. En la simulación se obtuvieron unas eficiencias en la remoción de nitrógeno amoniacal de 98.6% y de remoción de carga orgánica del 95.6 %, para condiciones ideales del sistema, mientras que la evaluación de la eficiencia bajo condiciones reales fue del 91% para el amoniaco y del 99.8 % para la DQO, estos porcentajes de eficiencia pueden variar dependiendo el control de las condiciones operacionales.

## Introducción

Los efluentes de las aguas residuales domésticas son los principales responsables de diversos problemas de contaminación en los cuerpos de agua receptores, los contaminantes contenidos en las aguas residuales provocan la baja calidad del agua y la eutrofización de las masas de agua (Wijaya, Soedjono, & Fitriani, 2017). Las aguas residuales tienen un alto contenido de nitrógeno ya que, este se encuentra presente en los residuos de alimentos y las descargas de los inodoros, en los sistemas de tratamiento el amoniac es reducido por procesos convencionales de nitrificación aeróbica y la desnitrificación, pero en los últimos años se ha implementado un proceso biológico avanzado para la reducción del nitrógeno llamado oxidación anaeróbica del amonio “Anammox” el cual es una alternativa sostenible y rentable, que oxida el amoniac utilizando nitrito como aceptor de electrones en condiciones anaeróbicas para producir gas di nitrógeno.

La aplicación de las bacterias anammox es sostenible ya que, la demanda de carbono orgánico disminuye en un 100%, los requisitos de aireación en un 60% y la producción de lodos en un 90%. Por lo tanto, este proyecto busca determinar la eficiencia del proceso de la oxidación anaerobia del amoniac, si se llegara a implantar en la planta de tratamiento de agua residual de la ciudad de Tunja. Esto por medio de una estructura metodológica que parte de una revisión bibliográfica de las aplicaciones del proceso anammox, definiendo los procesos, funcionamiento, transformaciones y aplicaciones en plantas de tratamiento a escala real y de esta manera recopilar información acerca de las eficiencias del proceso anammox para posteriormente plantear un modelo matemático que describa el comportamiento del proceso de la oxidación del nitrógeno amoniacal presente en las aguas residuales de la ciudad de Tunja.

Este modelo funciona como una herramienta de toma de decisiones, ya que expone los resultados del comportamiento del proceso anammox aplicado a las condiciones operativas de la planta de tratamiento de la ciudad de Tunja, con el fin de determinar su eficiencia en la remoción de los contaminantes y establecer si es viable incorporar este tipo de procesos teniendo en cuenta que debe cumplir con la legislación Colombiana vigente como la resolución 631 del

## Oxidación anaerobia del amoníaco

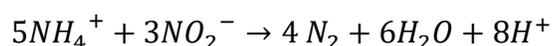
2015 y la resolución 699 del 2021, donde se estipulan los valores máximos permisibles para realizar vertimientos a cuerpos de agua superficial y al suelo como receptores finales.

### **1. Diagnóstico de la aplicación del proceso anammox en el tratamiento de las aguas residuales a gran escala**

#### **1.1. Conceptualización y descripción del proceso de oxidación anaerobia del amoníaco en aguas residuales domésticas**

El proceso Anammox corresponde a la oxidación anaeróbica del amonio, este proceso fue descubierto a principios de los años 90 's, donde se determinó que el proceso presentaba gran potencial en la remoción del nitrógeno amoniacal ( $\text{NH}_4^+$ ) y el dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2^-$ ) presente en las aguas residuales domésticas transformándolo en gas dinitrógeno ( $\text{N}_2$ ) y agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) (Stauffer & Spuhler, 2020). La evidencia de esta oxidación anaeróbica de amonio se basó en los balances de nitrógeno y redox en experimentos de flujo continuo, se demostró que para la oxidación de 5 moles de amonio, se requerían 3 moles de nitrito, lo que resultó en la formación de 4 moles de gas di nitrógeno (Mulder., Van de Graaf., Robertson & Kuenen, 1995) tal como se muestra en la siguiente ecuación:

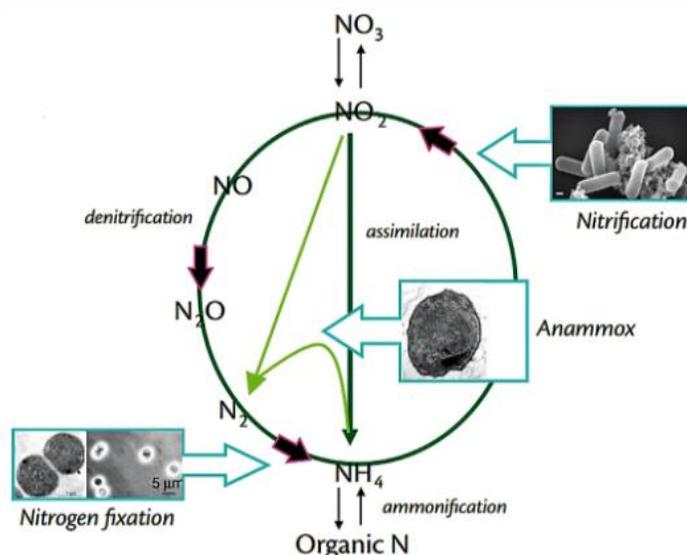
Anaerobic Ammonia Oxidation



Este proceso convierte amoníaco y nitrito directamente en gas dinitrógeno, en lugar de pasar por un proceso de dos etapas de nitrificación aeróbica y desnitrificación anaeróbica conllevando a la generación de nuevas oportunidades para la investigación y el desarrollo de sistemas sostenibles de eliminación de nitrógeno. El proceso presenta diferentes beneficios, entre ellos la disminución de los costos operativos ya que requiere menor energía para la aireación, de igual manera las bacterias Anammox no requieren carbono orgánico como si lo requiere el proceso convencional de nitrificación, lo que a su vez reduce la producción de lodos de exceso y

## Oxidación anaerobia del amoniaco

disminuye las emisiones de  $\text{CO}_2$ , en la siguiente figura se representa el proceso de anammox junto con la nitrificación y desnitrificación.



**Figura 1.** Ciclo del nitrógeno, tomado de: Sanabria, Bedoya & Sánchez, 2009.

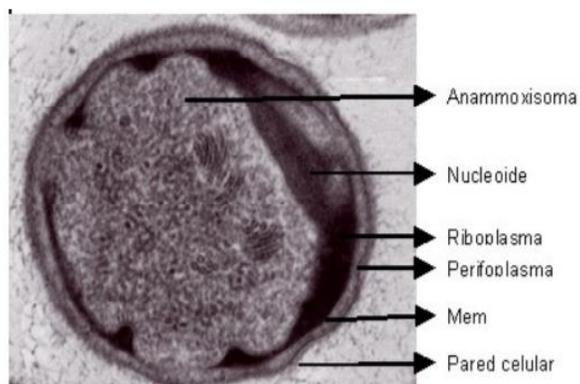
### Las bacterias Anammox

Las bacterias *anammox*, denominadas así por el tipo de metabolismo que realizan oxidación anaerobia de amonio (anaerobic ammonium), son microorganismos quimiolitotróficos que oxidan el  $\text{NH}_4$  con nitrito o nitrato como aceptor de electrones, obteniendo energía para la fijación de  $\text{CO}_2$  y produciendo  $\text{N}_2$ , poseen una versatilidad metabólica con capacidad de oxidar cadenas de ácidos grasos en presencia de  $\text{NO}_2$  o  $\text{NO}_3$ . Las bacterias *Anammox*, pertenecen al dominio Bacteria, Phylum *Planctomycetes*, clase *Planctomycetia*, orden *Planctomycetales* (descubiertas en 1986 por Schlessner y Stackebrandt) y a la familia *Planctomycetaceae*, donde se incluyen 4 géneros, *Planctomyces*, *Pirellula*, *Gemmata* e *Isosphaera*. El proceso anammox es realizado por un grupo de microorganismos, *Planctomyces*, de los cuales 5 subgéneros son: *Brocadia*, *Kuenenia*, *Scalindua*, *Anammoxoglobus* y *Jettenia* (Sanabria, Bedoya & Sánchez, 2009).

Las bacterias *Anammox* son coloides de menos de un micrómetro de diámetro y no pueden ser cultivadas en el laboratorio por técnicas convencionales, poseen organelas de doble

## Oxidación anaerobia del amoníaco

membrana, que los hacen similares a los Eucariotas y la ausencia de un polímero de peptidoglicano en su pared celular que los asemeja a las arqueas, las funciones de estas organelas están bajo estudio y se considera que en ellas se desarrolla la oxidación anaerobia de amonio, entre otras funciones se encuentran la división celular y replicación cromosómica. Las bacterias anammox contienen en la membrana del anamoxisoma lípidos ladderane, descritos como lípidos inusuales de baja energía y muy inestables, además de lípidos hopanoides que por su densidad e impermeabilidad evitan que los compuestos tóxicos intermediarios de la reacción, como la  $N_{24}$ , se dirijan al espacio extracelular y afecten las demás funciones celulares (Sanabria, Bedoya & Sánchez, 2009).



**Figura 2.** Microfotografía electrónica de Estructura celular, tomado de: Sanabria, Bedoya & Sánchez, 2009.



**Figura 3.** Muestra de lodos granulares Anammox, tomado de: (Wei., Jin & Zhang, 2020).

## **1.2. Caracterización del proceso anammox frente a procesos convencionales de tratamiento de aguas residuales**

La nitrificación y desnitrificación son reacciones químicas que ocurren dentro de células vivas o bacterias, por lo tanto, se consideran reacciones "bioquímicas", el nitrógeno es un elemento que se incorpora a compuestos orgánicos y compuestos inorgánicos debido a su capacidad para formar fácilmente enlaces químicos con otros elementos como carbono, hidrógeno y oxígeno (Gerardi, 2003). La forma convencional de eliminar los compuestos de nitrógeno presentes en el agua residual doméstica es por medio de los procesos de nitrificación y desnitrificación, la nitrificación es un proceso de dos pasos, en el primero de ellos el amoníaco se oxida primero a nitrito por bacterias oxidantes de amoníaco y/o arqueas, posteriormente a nitrato por bacterias oxidantes de nitrito, esta división del trabajo entre los dos grupos funcionales es una característica generalmente aceptada del ciclo biogeoquímico del nitrógeno (van Kessel., Speth & Albertsen, 2015). Por otra parte, la desnitrificación es definida como "la reducción microbiana de nitrato o nitrito a nitrógeno gaseoso ya sea como nitrógeno molecular o como óxido de nitrógeno. La desnitrificación se refiere a la reducción por bacterias esencialmente aeróbicas, de una o ambos de los óxidos de nitrógeno iónicos (nitrato,  $\text{NO}_3$ , y nitrito,  $\text{NO}_2$ ) a los óxidos gaseosos (óxido nítrico,  $\text{NO}$  y óxido nitroso,  $\text{N}_2\text{O}$ ), que pueden reducirse aún más a dinitrógeno ( $\text{N}_2$ ). Los óxidos de nitrógeno actúan como aceptores terminales de electrones en ausencia de oxígeno (Knowles, 1982).

Actualmente, las prácticas de tratamiento de aguas residuales pueden mejorarse significativamente mediante la introducción de nuevas tecnologías de tratamiento microbiano. Para cumplir con los estándares de descarga cada vez más estrictos, se deben implementar nuevas aplicaciones y estrategias de control para la eliminación sostenible de amonio de las aguas residuales (Peng & Zhu, 2006).

## **1.3. Aplicaciones del proceso Anammox dentro un sistema de tratamiento**

El primer reactor Anammox a escala real se puso en funcionamiento en 2002 en la planta de tratamiento de lodos Sluisjesdijk en Rotterdam y al demostrar los beneficios tanto económicos

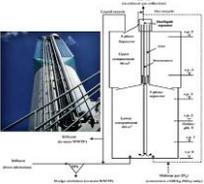
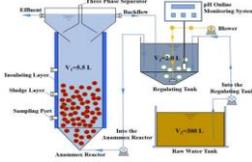
## Oxidación anaerobia del amoníaco

como ambientales de implementar el proceso anammox para la eliminación de nitrógeno, se ha puesto en marcha en más de 100 plantas a gran escala en todo el mundo, a continuación, se describe la eficiencia de algunas de estas plantas de tratamiento.

## Oxidación anaerobia del amoniaco

**Tabla 1.**

*Aplicación del proceso anammox en plantas de tratamiento de aguas residuales a gran escala.*

| País/Ciudad             | Nombre de la planta   | Características y/o procesos  | Eficiencia del proceso anammox   | Beneficios  | Imagen  |
|-------------------------|---|---|--|---|---|
| Rotherdam, países bajos | Waterboard Hollandse Delta  | Cuenta con un reactor a gran escala de 70 m <sup>3</sup> para tratar 500 kg-N / d, tiene una capacidad de 620.000 equivalentes de población y consta de un proceso AB de dos etapas. Waterboard Delta Hollandse fue el primero para decidir sobre anammox como el procedimiento preferido para la recuperación de nitrógeno del agua de rechazo.  | Su eficiencia de remoción es de más del 95% del amonio y más del 85% del nitrógeno del agua de rechazo, mientras que solo requiere 72 m <sup>3</sup> de espacio.   | La tecnología Anammox ahorra más de 250 toneladas de metanol al año y 275.000 kWh de energía eléctrica. La producción de lodos del tratamiento de aguas de rechazo se reduce en 40 toneladas de materia seca. También genera ahorros anuales de € 125,000 en costos operativos y una reducción de la huella de carbono de STW en 500 toneladas por año. |    |
| China                   | Las aguas residuales del campus de la Universidad Tecnológica de Guilin | Los procesos de tratamiento de aguas residuales más comunes utilizados en las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas en China incluyen los procesos anaeróbico / anóxico/óxico (A2/O). Las cantidades de inoculación de los lodos nitrificantes parciales y ANAMMOX fueron 1500 y 300 mL, respectivamente, y las concentraciones fueron 2000 y 3000 mg / L. el tanque tiene una capacidad de llenado de 2 L    | Las tasas de eliminación de DQO, NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N y TN fueron aproximadamente del 89%, 96,7% y 70%, respectivamente   |   |    |
| Holanda                 | Empresa Redac Son y la compañía Paques                                  | Combina la digestión anaerobia y el proceso anammox, planta de tratamiento de agua residual capaz de generar energía verde, en la cual se procesan residuos de mataderos donde se convierten en biocombustibles, se combinan procesos de digestión anaerobia y procesos anammox para tener eficiencia en la remoción de materia orgánica y nitrógeno amoniacal, así como el aprovechamiento de biogás producido en el proceso | la eficiencia en la eliminación del nitrógeno amoniacal fue del 62% con respecto a la concentración del efluente   | estos procesos son capaces de ahorrar energía que podría satisfacer a más de 300.000 viviendas, además del ahorro de energía y la disminución de la emisión de gases de efecto invernadero  |   |
| Brasil                  | planta de Tupi y Igarapé do Tietê                                       | Innovador sistema que combina, en un solo reactor, tratamiento anaerobio, tratamiento aeróbico, decantación de sólidos y lavado del biogás. Ideal para tratar el desagüe doméstico de poblaciones de 5.000 a 200.000 habitantes (barrios y municipios).   | Se obtuvo una eficiencia media de tratamiento de DQO y DBO del 87% y 90% en Tupi y del 80% y 83% en Igarapé do Tietê, respectivamente. Se observó nitrificación en la planta de Tupi, lo que resultó en una eliminación del 71% de TKN y del 83% de NH <sub>4</sub> -N | La cantidad de lodo excedente fue de aproximadamente 0,15 kg SST/kg de DQO. La ausencia de malos olores se confirmó en el área urbana cercana.  |  |

Elaborado por: Autores

## 2. Caracterización del agua residual doméstica de la planta de tratamiento de agua residual de Tunja-Boyacá

### 2.1 Descripción de la PTAR de la ciudad de Tunja

Tunja, capital del departamento de Boyacá, se encuentra localizada a una altura de 2.783 msnm, con una extensión urbana de 19,7661 Km<sup>2</sup> corresponden al área urbana, según el Plan de Ordenación y Manejo Ambiental –POMCA (2006) de la cuenca alta del río Chicamocha, los factores que más han incidido a la contaminación de la cuenca son la descarga de aguas residuales urbanas sin tratar, al igual que la de efluentes industriales.



**Figura 4.** Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (VEOLIA) Tunja – Boyacá, elaborado por: Autores

El proyecto para la construcción de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales – PTAR de la ciudad de Tunja, empezó a consolidarse en el año 2006, nació como parte del Programa Saneamiento Para Vertimientos –SAVER, y entró en funcionamiento en el año

2017 con dos de sus tres módulos construidos. Actualmente la planta está a cargo de Proactiva Aguas de Tunja, empresa prestadora del servicio de acueducto y alcantarillado. La PTAR de Tunja busca remover y tratar en un 80% la carga contaminante del municipio sobre la cuenca y contribuir al saneamiento del río Jordán y la cuenca alta del río Chicamocha, las estructuras cuentan con la capacidad de tratar 450 litros de agua por segundo. Según el informe ejecutivo de modificaciones al Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos – PSMV de Tunja, la PTAR se proyectó en módulos autónomos para cubrir de manera paulatina el crecimiento de la ciudad (Contreras & García, 2005).

El proceso de tratamiento de las aguas residuales en la PTAR es de tipo biológico, y comprende una fase anaeróbica seguido de una fase aerobia de bajo consumo energético y una alta eficiencia de remoción. El tratamiento preliminar está compuesto por una rejilla auto limpiante encargada de remover sólidos de gran tamaño y un desarenador que separa del agua las arenas, gravas y cenizas. El tratamiento secundario se vale de un reactor anaerobio de flujo ascendente UASB (tratamiento anaerobio), un tanque de aireación (tratamiento aerobio) y un sedimentador secundario. Durante el tratamiento anaerobio se degrada la materia orgánica por la acción de microorganismos en ausencia de oxígeno. Posteriormente, durante el tratamiento aerobio las aguas reciben un proceso biológico en donde microorganismos en presencia de oxígeno se alimentan de la materia orgánica remanente del tratamiento anterior, convirtiéndola en subproductos como gas carbónico, agua y nuevos microorganismos. Por su parte, el sedimentador secundario remueve los sólidos que se han sedimentado a la salida del tanque de aireación. Finalmente, el tratamiento de subproductos está compuesto por un espesador de lodos, un deshidratador centrífugo (deshidratación de lodos para su disposición final), un quemador de biogás (combustión del gas metano proveniente del reactor anaerobio UASB) y un lavado  $H_2S$ , con dichos procesos se presenta una remoción de la carga contaminante cercanos al 80 %, lo que implica una mejora en las condiciones de salud pública para los tunjanos y asegurará, con la recuperación integral de los ríos de la ciudad, un escenario medioambiental óptimo (Contreras & Garcia, 2005).

## **2.2. Caracterización del agua residual de la ciudad de Tunja**

A continuación, se presenta la caracterización del agua residual tratada en la planta de tratamiento de aguas residuales (VEOLIA) Tunja.

**Tabla 2.***Medición de los parámetros medidos en campo de agua residual cruda de Tunja*

|                         | <b>Parámetros in- situ</b> | <b>Unidad</b>         | <b>Valor</b> |
|-------------------------|----------------------------|-----------------------|--------------|
|                         | CAUDAL                     | (L/s)                 | 450          |
| <b>Medidos en campo</b> | pH                         |                       | 7.77         |
|                         | TEMPERATURA                | C°                    | 18.9         |
|                         | OXIGENO DISUELTO           | mg(O <sub>2</sub> )/L | 6.66         |

Elaborado por: Autores

**Tabla 3.***Parámetros fisicoquímicos del agua residual*

|                                       | <b>Constituyentes</b>       | <b>Unidad</b>         | <b>Concentración</b>  |
|---------------------------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|
| <b>Laboratorio de aguas proactiva</b> | BDO5                        | mg/L                  | 537                   |
|                                       | DQO                         | mg/L                  | 752                   |
|                                       | fosforo reactivo total      | mg/L                  | 21.81                 |
|                                       | grasas y aceites            | mg/L                  | 107                   |
|                                       | nitratos                    | mg/L                  | <0.1                  |
|                                       | nitritos                    | mg/L                  | <0.007                |
|                                       | oxígeno disuelto            | mg(O <sub>2</sub> )/L | 0.68                  |
|                                       | solidos suspendidos totales | mg/L                  | 363                   |
|                                       | coliformes fecales          | NMP/100ml             | 1.5*10 <sup>-7</sup>  |
|                                       | coliformes termo tolerantes | NMP/100ml             | 1.85*10 <sup>7</sup>  |
|                                       | coliformes totales          | NMP/100ml             | 3.448*10 <sup>8</sup> |

Elaborado por: Autores

En la tabla 2 se muestra la concentración de los parámetros que por su naturaleza se deben medir in situ ya que cambian su concentración con facilidad, como lo son el pH, temperatura y oxígeno disuelto, en la tabla 3 se muestra la concentración de los constituyentes físicos, químicos y microbiológicos que aportan a la baja calidad del agua, los cuales son los que se

## Oxidación anaerobia del amoníaco

requieren remover para cumplir con los valores máximos establecidos en la legislación colombiana vigente.

### 3. Formulación e implementación del modelo del proceso Anammox

#### 3.1 Modelo del proceso de la oxidación anaerobia del amoníaco en aguas residuales domésticas mediante el simulador GPS-X

El primer simulador dinámico de una planta de tratamiento de aguas residuales lanzado comercialmente es GPS-X, siendo la herramienta más avanzada empleada en el modelado matemático, control, optimización y gestión de plantas de tratamiento de aguas residuales. GPS-X ofrece modelos calibrados y un conjunto más completo de procesos unitarios, con análisis de sensibilidad, administrador de escenarios y análisis estadístico de diferentes procesos (Hydromantis, 2021). Con base en lo anterior, se plantea un esquema de proceso Anammox en el software de GPS-X, donde el efluente contiene las características del agua residual cruda que entra a la planta de tratamiento de la ciudad de Tunja, esto se establece por medio del “concejero del efluente” el cual usa una relación matemática entre los parámetros para establecer su concentración. En la siguiente figura se presentan las concentraciones de los parámetros del agua residual cruda del municipio de Tunja en la composición del afluente en el modelo.

| Influent Advisor - Library: mantis2lib - Influent Model: codstates - Biological Model: mantis2 |                                     |           |        |
|--|-------------------------------------|-----------|--------|
| <b>User Inputs</b>   |                                     |           |        |
| - Influent Composition   |                                     |           |        |
| cod  | total COD                           | gCOD/m3   | 752.0  |
| tkn  | total TKN                           | gN/m3     | 40.0   |
| tp   | total phosphorus                    | gP/m3     | 21.81  |
| - Nitrogen Compounds   |                                     |           |        |
| snh  | ammonia nitrogen                    | gN/m3     | 20.0   |
| snoi   | nitrite                             | gN/m3     | 0.007  |
| snoa   | nitrate                             | gN/m3     | 0.1    |
| - Phosphorus Compounds   |                                     |           |        |
| sp   | ortho-phosphate                     | gP/m3     | 8.0    |
| xpp  | stored poly-phosphate in PAO        | gP/m3     | 0.5    |
| - Influent Fractions   |                                     |           |        |
| ivsstots   | VSS/TSS ratio                       | gVSS/gTSS | 0.082  |
| - Organic Fractions  |                                     |           |        |
| frsi   | soluble inert fraction of total ... |           | 0.0001 |
| frss   | readily biodegradable fractio...    |           | 0.98   |
| frxi   | particulate inert fraction of t...  |           | 0.001  |
| frscol   | colloidal fraction of slowly bi...  |           | 0.1    |
| - Nitrogen Fractions   |                                     |           |        |
| frsnh  | ammonium fraction of solub...       |           | 0.9    |
| insi   | N content of soluble inert ma...    | gN/gCOD   | 0.1    |
| inxi   | N content of inert particulate...   | gN/gCOD   | 0.005  |
| - Phosphorus Fractions   |                                     |           |        |
| ipsi   | P content of soluble inert ma...    | gP/gCOD   | 0.1    |
| ipxi   | P content of inert particulate...   | gP/gCOD   | 0.1    |
| - pH and Alkalinity  |                                     |           |        |
| <b>State Variables</b>   |                                     |           |        |
| - Soluble Gases  |                                     |           |        |
| so   | dissolved oxygen                    | gO2/m3    | 6.66   |
| + Other Soluble Gases  |                                     |           |        |
| + Other Soluble Organic Variables  |                                     |           |        |
| + Other Particulate Organic Compounds  |                                     |           |        |
| - Nitrogen Variables   |                                     |           |        |
| snh  | ammonia nitrogen                    | gN/m3     | 20.0   |
| snoi   | nitrite                             | gN/m3     | 0.007  |
| snoa   | nitrate                             | gN/m3     | 0.1    |
| + Other Nitrogen Variables   |                                     |           |        |
| - Phosphorus Variables   |                                     |           |        |
| sp   | ortho-phosphate                     | gP/m3     | 8.0    |
| + Other Phosphorus Variables   |                                     |           |        |
| - Biomass Variables  |                                     |           |        |
| xbh  | heterotrophic biomass               | gCOD/m3   | 7.52   |
| xbai   | ammonia oxidizer biomass            | gCOD/m3   | 0.0    |
| xbaa   | nitrite oxidizer biomass            | gCOD/m3   | 0.0    |
| xbp  | phosphate accumulating bi...        | gCOD/m3   | 0.0    |
| xbf  | fermenting biomass                  | gCOD/m3   | 0.0    |
| xbpro  | acetogenic biomass                  | gCOD/m3   | 0.0    |
| xbacm  | acetoclastic methanogenic ...       | gCOD/m3   | 0.0    |
| xbh2m  | hydrogenotrophic methano...         | gCOD/m3   | 0.0    |
| xbmet  | methylotrophic biomass              | gCOD/m3   | 0.0    |
| xbax   | anammox biomass                     | gCOD/m3   | 0.0    |
| - Carbon Variables   |                                     |           |        |
| stic   | total soluble inorganic carbon      | gC/m3     | 62.3   |
| <b>Composite Variables</b>   |                                     |           |        |
| - Solids Variables   |                                     |           |        |
| x  | total suspended solids              | g/m3      | 363.3  |
| vss  | volatile suspended solids           | g/m3      | 29.8   |
| xiss   | total inorganic suspended s...      | g/m3      | 333.5  |
| ivt  | VSS/TSS ratio                       | gVSS/gTSS | 0.082  |
| - Organic Variables  |                                     |           |        |
| sCOD   | soluble COD                         | gCOD/m3   | 737.7  |
| cod  | total COD                           | gCOD/m3   | 752.0  |
| sbod   | soluble cBOD5                       | gO2/m3    | 528.9  |
| bod  | total cBOD5                         | gO2/m3    | 536.6  |
| stbod  | soluble cnBOD5                      | gO2/m3    | 630.4  |
| ttbod  | total cnBOD5                        | gO2/m3    | 719.4  |
| svfa   | volatile fatty acids                | g/m3      | 0.0    |
| + Other Organic Variables  |                                     |           |        |
| - Nitrogen Variables   |                                     |           |        |
| snox   | nitrite and nitrate                 | gN/m3     | 0.107  |
| tkn  | total TKN                           | gN/m3     | 40.0   |
| tn   | total nitrogen                      | gN/m3     | 40.1   |
| tninert  | total inert organic nitrogen        | gN/m3     | 0.0113 |
| + Other Nitrogen Variables   |                                     |           |        |
| - Phosphorus Variables   |                                     |           |        |
| stp  | soluble total phosphorus            | gP/m3     | 8.01   |
| tp   | total phosphorus                    | gP/m3     | 21.8   |
| tpinert  | total inert organic phosphorus      | gP/m3     | 0.0827 |
| + Other Phosphorus Variables   |                                     |           |        |
| + Other Biomass Variables  |                                     |           |        |

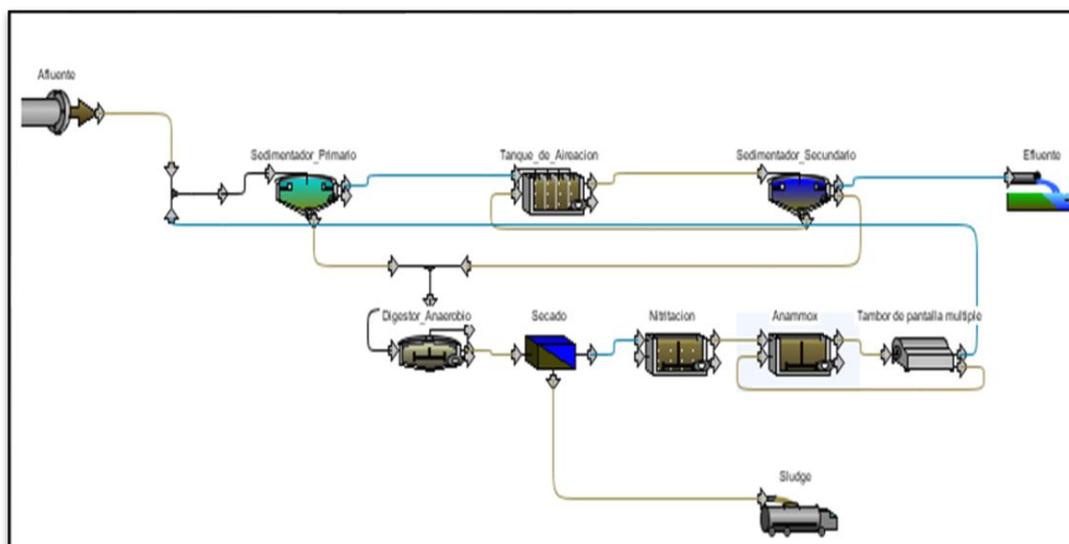
Figura 5. Consejero del afluente, elaborado por: Autores

Una vez ajustados los valores de la caracterización del agua residual en el afluente, se plantea todo el esquema del proceso, para este esquema se tomó como referencia la modelación de los procesos de nitrificación y anammox en GPS-X expuestos en el seminario

## Oxidación anaerobia del amoníaco

de modelación de hydromatis, el cual cuenta con un proceso de lodos activados que es implementado en el tratamiento de aguas residuales y se fundamenta en la utilización de microorganismos (bacterias heterótrofas facultativas), que crecen en el agua residual, convirtiendo la materia orgánica disuelta en productos más simples como nuevas bacterias, dióxido de carbono y agua, este proceso está conformado por un sedimentador primario, un tanque de aireación y un sedimentador secundario, esto con el fin de remover u oxidar la carga orgánica y con ello promover el crecimiento de microorganismos que toman como fuente de energía los nutrientes presentes en dicha materia orgánica, como lo es el fosforo y el nitrógeno biodegradable, posterior a este proceso se conecta el lodo que resulta del sedimentador secundario con un digestor anaerobio que cumple el papel de estabilizar el lodo en condiciones anaerobias, en esta estructura se presenta una actividad metabólica por parte de los microorganismos anaerobios u/o anaerobios facultativos y debido a esto se aumenta la temperatura a un promedio de 35 °C, es decir que aparecen microorganismos termófilos.

Posteriormente este flujo pasa a través de un lecho de secado en el cual se deshidratan los lodos para su disposición final y de este se obtiene un caudal con alto contenido de nitrógeno amoniacal, el cual es oxidado a nitrito ( $\text{NO}_2$ ) esto se logra por medio de un tanque aerobio donde se realiza el proceso de nitrificación parcial convencional, el cual requiere de oxígeno disuelto que será utilizado por bacterias lito-Autótrofas para transformar el  $\text{NH}_3$  a  $\text{NO}_2$ ; el caudal proveniente del tanque de aireación tiene una alta concentración de nitrito la cual es usada como agente oxidante para el proceso anammox que se lleva a cabo en un tanque anaerobio, allí el nitrito es transformado por las bacterias anammox a nitrógeno gaseoso, el efluente de este tanque se conecta a la centrifuga que separa la biomasa del agua ya tratada en el tanque anammox y la recircula nuevamente a todo el proceso y la semilla anammox se reintegra al tanque anaerobio como se muestra a continuación.



**Figura 6.** Esquema del proceso Anammox modelado mediante GPS-X, elaborado por: Autores.

Para dar cumplimiento al objetivo del trabajo y determinar la eficiencia del proceso, se plantean dos modelos, el primero de ellos cuenta con las condiciones operativas de la planta de tratamiento de agua residual de la ciudad de Tunja, es decir el caudal y el volumen de cada uno de los elementos que conforman el sistema; el segundo donde se trata el mismo caudal pero con un volumen que garantice un tiempo hidráulico de retención de 9 horas, tiempo necesario para que las bacterias anammox oxiden el nitrógeno amoniacal.

### 3.1.1. Planteamiento del modelo en condiciones operativas reales.

Para la formulación de este modelo se tomó como referencia el informe técnico de la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Tunja, donde se especifican las dimensiones de cada uno de los elementos que conforman dicho sistema, como se muestra a continuación.

**Tabla 4.**

*Condiciones técnicas de la PTAR de la ciudad de Tunja*

| Especificaciones técnicas |                              |                           |                                  |                 |
|---------------------------|------------------------------|---------------------------|----------------------------------|-----------------|
| Elemento                  | VOLUMEN<br>(m <sup>3</sup> ) | Dimensionamiento          |                                  | CAUDAL<br>(L/s) |
|                           |                              | ÁREA<br>(m <sup>2</sup> ) | ALTURA ÚTIL<br>(m <sup>2</sup> ) |                 |

## Oxidación anaerobia del amoníaco

|                         |      |     |     |     |
|-------------------------|------|-----|-----|-----|
| SEDIMENTADORES          | 1945 | 432 | 4.5 |     |
| TANQUES DE<br>AIREACIÓN | 2469 | 588 | 4.2 |     |
| DIGESTOR<br>ANAEROBIO   | 2895 | 579 | 5   | 450 |
| TANQUE<br>ANNAMOX       | 2469 | 588 | 4.2 |     |

---

Elaborado por: Autores

Luego de definir las dimensiones de cada uno de los elementos que conforman el sistema, se especifica el modelo Carbono-Nitrógeno, fósforo y pH (mantis2lib), evaluando el comportamiento del nitrógeno amoniacal, nitrito, nitrato, gas di nitrógeno soluble, demanda biológica de oxígeno (DBO) y demanda química de oxígeno (DQO) y la producción de biomasa anammox.

### 3.1.2. Planteamiento del modelo en condiciones operativas ideales

El segundo modelo opera con un caudal en el afluente de 38880 m<sup>3</sup>/d y un tiempo hidráulico de retención de 9 horas, por lo tanto, se busca que las estructuras tengan un volumen que garantice dicho tiempo de retención y basados en la fórmula de tiempo hidráulico se obtiene:

$$THR = \frac{V}{Q}$$

Despejando V

$$V = THR * Q$$

Reemplazando

$$V = 0.375 \text{ d} * 38880 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$$

$$V = 14580 \text{ m}^3$$

Dicho volumen se plantea para cada una de las estructuras que conforman el proceso de remoción anaerobia del amoníaco, el tipo de modelo a utilizar comprende una relación de Carbono-Nitrógeno, fósforo y pH (mantis2lib). Una vez ajustados todos los valores de

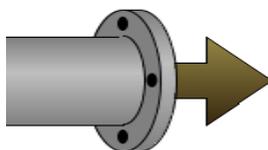
entrada al sistema, se procede a simular el comportamiento del proceso planteado en estado estacionario (la concentración no varía en el tiempo) con fin de determinar los valores de remoción, evaluando el comportamiento del nitrógeno amoniacal, nitrito, nitrato, gas di nitrógeno soluble, demanda biológica de oxígeno (DBO) y demanda química de oxígeno (DQO) y la producción de biomasa anammox.

### 3.2 Análisis de resultados de la modelación del proceso Anammox

A continuación, se presentan los resultados obtenidos dentro de cada uno de los modelos teniendo en cuenta los componentes hidráulicos que integran el proceso Anammox modelado mediante el programa de simulación de tratamiento del agua residual GPS-X. Estos resultados se presentan siguiendo la secuencia de esquema anteriormente planteado, desde el tratamiento preliminar de remoción de carga orgánica de lodos activados, seguido del proceso anammox que inicia con el tanque de digestión anaerobia y finaliza con el tambor de pantallas múltiples o centrifuga.

#### 3.2.1 Análisis de resultados basados en las condiciones operativas de Tunja

##### 3.2.1.1 Afluente.



*Figura 7.* Afluente del sistema, elaborado por: Autores mediante GPS-X

**Tabla 5.**

*Caracterización del afluente*

| <b>Resultados de la simulación</b> |      |           |  |
|------------------------------------|------|-----------|--|
| <b>Influent Composition</b>        |      |           |  |
| TotalCOD                           | 752  | [gCOD/m3] |  |
| total TKN                          | 40   | [gN/m3]   |  |
| total phosphorus                   | 21.8 | [gP/m3]   |  |
| <b>Nitrogen Compounds</b>          |      |           |  |
| ammonia nitrogen                   | 20   | [gN/m3]   |  |

## Oxidación anaerobia del amoníaco

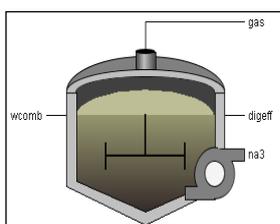
|  |        |                      |
|--|--------|----------------------|
| nitrite  | 0.007  | [gN/m <sup>3</sup> ] |
| nitrate  | 0.1    | [gN/m <sup>3</sup> ] |
| <b>Phosphorus Compounds</b>                    |        |                      |
| ortho-phosphate                                | 8      | [gP/m <sup>3</sup> ] |
| stored poly-phosphate in PAO                   | 0.5    | [gP/m <sup>3</sup> ] |
| <b>Influent Fractions</b>                      |        |                      |
| VSS/TSS ratio                                  | 0.082  | [gVSS/gTSS]          |
| <b>Organic Fractions</b>                       |        |                      |
| soluble inert fraction of total COD            | 0.0001 | [-]                  |
| readily biodegradable fraction of total COD    |        |                      |
| COD  | 0.98   | [-]                  |
| particulate inert fraction of total COD        | 0.001  | [-]                  |
| colloidal fraction of slowly biodegradable COD |        |                      |
| COD  | 0.1    | [-]                  |

---

Elaborado por: Autores

Los resultados expuestos en la tabla 5 evidencia las concentraciones de los constituyentes obtenidos a partir del ajuste del concejero del afluente con las respectivas fracciones orgánicas, las cuales aportan a los resultados del modelo matemático en cada una de las estructuras o procesos que integran el modelo.

### 3.2.1.2 Digestor anaerobio.



**Figura 8.** Tanque Digestor Anaerobio, elaborado por: Autores mediante GPS-X

### Tabla 6.

*Resultado de las concentraciones obtenidas dentro del digestor anaerobio*

---

### Resultados de simulación

---

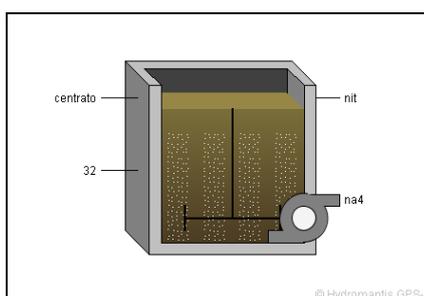
## Oxidación anaerobia del amoníaco

|                            |                        | wcomb    | digeff    | na3       |
|----------------------------|------------------------|----------|-----------|-----------|
| Flow                       | m <sup>3</sup> /d      | 40       | 40        | 0         |
| TSS                        | mg/L                   | 17349.75 | 14828.193 | 14828.193 |
| VSS                        | mg/L                   | 1192.772 | 85.898072 | 85.898072 |
| COD                        | mg/L                   | 1530.126 | 168.18814 | 168.18814 |
| Ammonia N                  | mgN/L                  | 21.15246 | 622.27363 | 622.27363 |
| Soluble PO <sub>4</sub> -P | mgP/L                  | 14.43919 | 471.59588 | 471.59588 |
| TP                         | mgP/L                  | 481.0111 | 480.98984 | 480.98984 |
| Total Alkalinity           | mgCaCO <sub>3</sub> /L | 270.9159 | 2769.5351 | 2769.5351 |
| pH                         | -                      | 7.75489  | 8.6944046 | 8.6944046 |
| DO                         | mgO <sub>2</sub> /L    | 0        | 0         | 0         |

Elaborado por: Autores

En los resultados expuestos en la tabla 6 se puede observar las concentraciones obtenidas dentro del tanque de digestión anaerobia, en los cuales por la actividad metabólica de las bacterias anaerobias allí presentes, transforma una fracción de la demanda química de oxígeno de 0.78, adicionalmente por las condiciones anaerobias en las que se encuentra las bacterias se presenta un aumento en las concentraciones de solidos suspendidos totales y del nitrógeno debido a la oxidación parcial del amoníaco, la cual será usado como nutriente en el posterior proceso del tratamiento.

### 3.2.1.3 Tanque de Nitrificación.



**Figura 9.** Tanque de Nitrificación, elaborado por: Autores mediante GPS-X

### Tabla 7.

*Resultados obtenidos dentro del tanque de nitrificación*

### Resultados de simulación

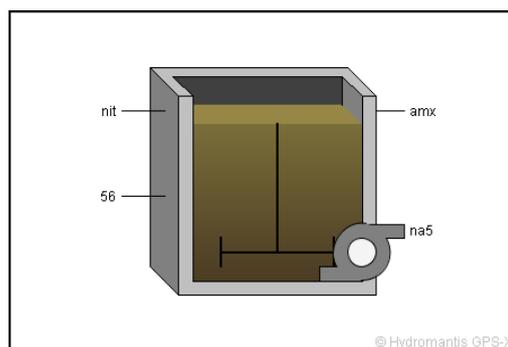
## Oxidación anaerobia del amoniac

|                    |            | centrato | Internal  | Nit       |
|--------------------|------------|----------|-----------|-----------|
| MLSS               | mg/L       | 741.4096 | 754.77872 | 754.77872 |
| MLVSS              | mg/L       | 4.294904 | 10.700991 | 10.700991 |
| Soluble COD        | mg/L       | 38.99121 | 1.0077754 | 1.0077754 |
| Ammonia N          | mgN/L      | 622.2736 | 234.34301 | 234.34301 |
| Nitrite N          | mgN/L      | 9.74E-06 | 383.10791 | 383.10791 |
| Nitrate N          | mgN/L      | 3.23E-05 | 0.0019574 | 0.0019574 |
| Soluble PO4-P      | mgP/L      | 471.5959 | 469.61683 | 469.61683 |
| TP                 | mgP/L      | 472.0727 | 472.08017 | 472.08017 |
| Total Alkalinity   | mgCaCO3/L  | 2769.586 | 1385.0688 | 1385.0688 |
| pH                 | -          | 9.107872 | 5.6361771 | 5.6361771 |
| HRT                | h          | -        | 1804.6739 | -         |
| DO                 | mgO2/L     | -        | 1.9999975 | -         |
| Total OUR          | mgO2/(L.h) | -        | 0.747736  | -         |
| Nitrification Rate | mgN/(L.h)  | -        | 0.2173662 | -         |
| Nitrate Util. Rate | mgN/(L.h)  | -        | 9.132E-06 | -         |
| Total Air Flow     | m3/h       | -        | 56.933955 | -         |
| SOTE               | %          | -        | 30        | -         |
| Actual OTR         | kg/h       | -        | 2.1678677 | -         |

Elaborado por: Autores

En la tabla 7 se observan los resultados obtenidos en el modelo después de someter el agua a un proceso de nitrificación aerobia, en el cual los microorganismos se encargan de transformar el nitrógeno amoniacal producido en el digestor anaerobio para realizar la nitrificación parcial, produciendo 383.1 mgN/L nitrito el cual será usado como agente oxidante por las bacterias anammox en el reactor anaerobio.

### 3.2.1.4 Tanque Anammox.



**Figura 10.** Tanque Anammox, elaborado por: Autores por medio de GPS-X

**Tabla 8.**

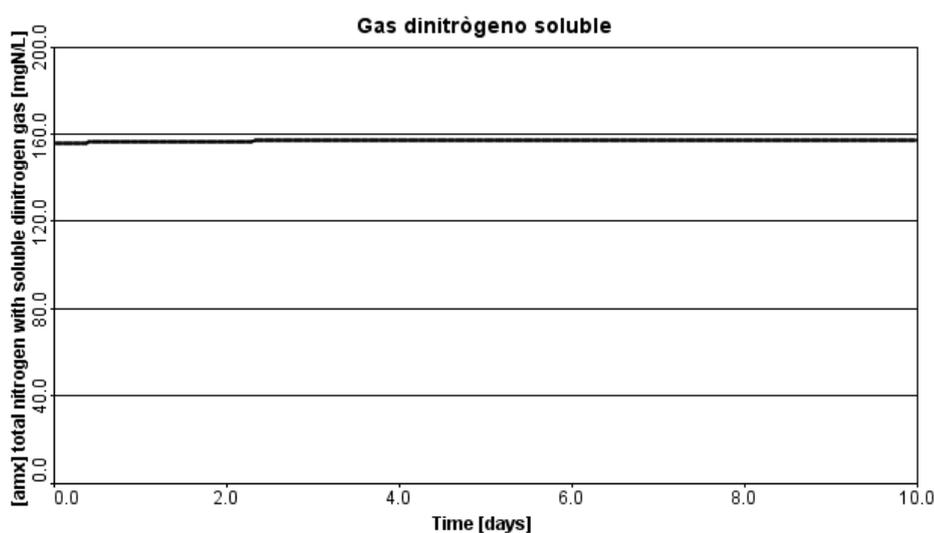
*Resultados de la simulación en el tanque anammox*

| <b>Resultados de simulación</b> |            |          |           |           |
|---------------------------------|------------|----------|-----------|-----------|
|                                 |            | nit      | Internal  | Amx       |
| MLSS                            | mg/L       | 754.7787 | 2514.5853 | 2514.5853 |
| MLVSS                           | mg/L       | 10.70099 | 52.99041  | 52.99041  |
| Soluble COD                     | mg/L       | 1.007775 | 1.3604805 | 1.3604805 |
| Ammonia N                       | mgN/L      | 234.343  | 1.8256773 | 1.8256773 |
| Nitrite N                       | mgN/L      | 383.1079 | 79.440915 | 79.440915 |
| Nitrate N                       | mgN/L      | 0.001957 | 52.992665 | 52.992665 |
| Soluble PO4-P                   | mgP/L      | 469.6168 | 471.01285 | 471.01285 |
| TP                              | mgP/L      | 472.0802 | 472.96636 | 472.96636 |
| Total Alkalinity                | mgCaCO3/L  | 1385.069 | 365.25912 | 365.25912 |
| pH                              | -          | 5.636177 | 6.293602  | 6.293602  |
| HRT                             | h          | -        | 1768.5804 | -         |
| DO                              | mgO2/L     | -        | 0.0016006 | -         |
| Total OUR                       | mgO2/(L.h) | -        | 0.0011073 | -         |
| Nitrification                   |            |          |           |           |
| Rate                            | mgN/(L.h)  | -        | 0.1295009 | -         |
| Nitrate Util. Rate              | mgN/(L.h)  | -        | 0.0024519 | -         |

Elaborado por: Autores

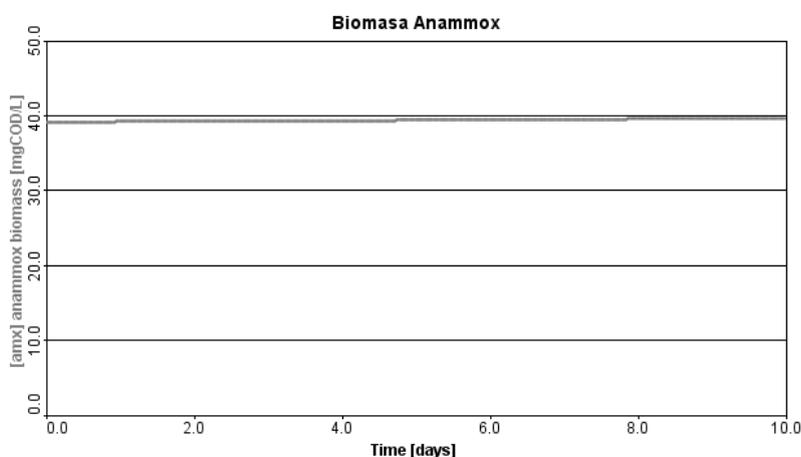
## Oxidación anaerobia del amoníaco

En la tabla 8 se muestran los resultados del proceso anammox, donde se puede evidenciar que el proceso remueve en gran parte la concentración del nitrógeno amoniacal registrando en su efluente un valor de 1.82 mgN/L, es decir oxido 232.53 mgN/L del nitrógeno total que ingreso al reactor, adicionalmente se oxido el nitrito formado en el tanque aerobio durante el proceso de nitrificación parcial con un valor de 303.66 mgN/L.



**Figura 11.** Concentración de gas di nitrógeno soluble en el tanque Anammox, elaborado por: autores por medio de GPS-X

Como se puede observar en la figura 11 la concentración en el tanque Anammox de gas di nitrógeno es de 157 mg/l resultante de la transformación de nitrito a gas di nitrógeno por medio del proceso anammox.

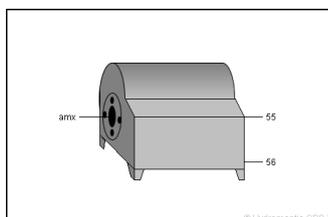


**Figura 12.** Concentración de bacterias anammox, elaborado Autores por medio de GPS-X

## Oxidación anaerobia del amoniaco

Adicionalmente en la figura 12 se muestra la producción de bacterias anammox en el reactor anaerobio producto del metabolismo para oxidar los nitritos a gas di nitrógeno la cual fue de 39.4 mg/L.

### 3.2.1.5 Centrifuga.



**Figura 13.** Pantalla múltiple, elaborado por: autores por medio de GPS-X

**Tabla 9.**

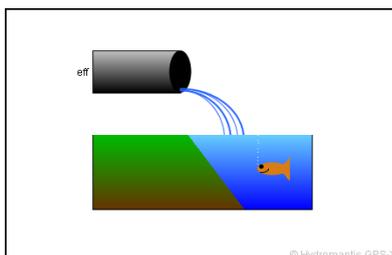
*Resultado de las concentraciones obtenidas dentro del tambor de pantallas múltiples*

| <b>Resultados de simulación</b> |           |          |           |           |
|---------------------------------|-----------|----------|-----------|-----------|
|                                 |           | amx      | 55        | 56        |
| Flow                            | m3/d      | 39.28571 | 38.5      | 0.7857143 |
| TSS                             | mg/L      | 2514.585 | 766.69691 | 88161.114 |
| COD                             | mg/L      | 77.60477 | 38.506747 | 1993.408  |
| Ammonia N                       | mgN/L     | 1.825677 | 1.8256773 | 1.8256773 |
| Soluble PO4-P                   | mgP/L     | 471.0128 | 471.01285 | 471.01285 |
| TP                              | mgP/L     | 472.9664 | 472.04803 | 517.96414 |
| Total Alkalinity                | mgCaCO3/L | 365.2591 | 365.25912 | 365.25912 |
| pH                              | -         | 6.293602 | 6.293602  | 6.293602  |
| DO                              | mgO2/L    | 0.001601 | 0.0016006 | 0.0016006 |

Elaborado por: Autores

La centrifuga tiene la función de separar los sólidos suspendidos del agua por medio de movimientos rotativos, en la tabla 9 se presentan una producción de solidos suspendidos totales de 767 mg/L, los cuales se recirculan al tanque anammox como semilla y concentración alta de bacterias anammox para continuar con el proceso de oxidar el nitrógeno amoniacal.

### 3.2.1.6. Efluente.



**Figura 14.** Efluente del sistema, elaborado por: Autores por medio de GPS-X

**Tabla 10.**

*Resultados de las concentraciones obtenidas del efluente del sistema*

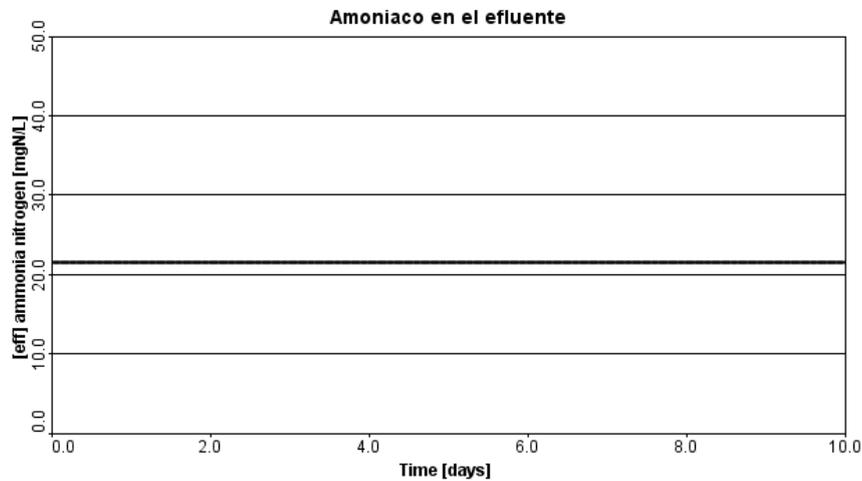
| <b>Resultados de simulación</b> |                        |          |
|---------------------------------|------------------------|----------|
|                                 |                        | eff      |
| Flow                            | m <sup>3</sup> /d      | 38878.5  |
| TSS                             | mg/L                   | 311.2217 |
| VSS                             | mg/L                   | 17.78416 |
| cBOD5                           | mg/L                   | 532.5111 |
| COD                             | mg/L                   | 746.77   |
| Ammonia N                       | mgN/L                  | 21.54276 |
| Nitrite N                       | mgN/L                  | 0.063613 |
| Nitrate N                       | mgN/L                  | 0.128138 |
| TKN                             | mgN/L                  | 39.3588  |
| TN                              | mgN/L                  | 39.55055 |
| Soluble PO <sub>4</sub> -P      | mgP/L                  | 16.43292 |
| TP                              | mgP/L                  | 21.7834  |
| Total Alkalinity                | mgCaCO <sub>3</sub> /L | 273.9321 |
| pH                              | -                      | 7.75489  |
| DO                              | mgO <sub>2</sub> /L    | 3.004955 |

Elaborado por: Autores

Una vez finalizados todos los procesos y determinadas las concentraciones como lo expone la tabla 10, el agua es vertida a un cuerpo receptor con una concentración de

## Oxidación anaerobia del amoníaco

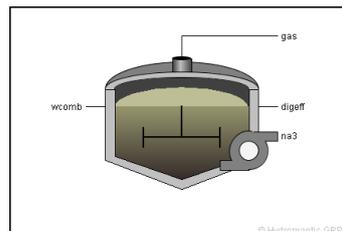
nitrógeno amoniacal de 21.5 mg/L tal y como se muestra en la figura 15, además otro constituyente importante a evaluar es la concentración de carga orgánica contaminante que será vertida la cual tiene una concentración de 746.77 mg/L.



**Figura 15.** Concentración de nitrógeno amoniacal en el efluente, elaborado por: Autores por medio de GPS-X

### 3.2.2 Análisis de resultados para un tiempo de retención de 9 horas.

#### 3.2.2.1 Digestor anaerobio.



**Figura 16.** Tanque Digestor Anaerobio, elaborado por: Autores mediante GPS-X

#### Tabla 11.

*Resultado de las concentraciones obtenidas dentro del digestor anaerobio*

| Resultados de simulación |      |       |        |      |
|--------------------------|------|-------|--------|------|
|                          |      | wcomb | digeff | na3  |
| Flow                     | m3/d | 40.00 | 40.00  | 0.00 |

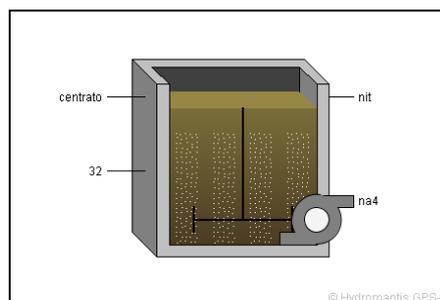
## Oxidación anaerobia del amoniaco

|                  |           |          |          |          |
|------------------|-----------|----------|----------|----------|
| TSS              | mg/L      | 21928.40 | 13895.85 | 13895.85 |
| VSS              | mg/L      | 6340.09  | 296.90   | 296.90   |
| COD              | mg/L      | 8786.51  | 449.32   | 449.32   |
| Ammonia N        | mgN/L     | 12.29    | 1033.64  | 1033.64  |
| Soluble PO4-P    | mgP/L     | 11.91    | 555.36   | 555.36   |
| TP               | mgP/L     | 565.03   | 565.03   | 565.03   |
| Total Alkalinity | mgCaCO3/L | 237.55   | 4338.67  | 4338.67  |
| pH               | -         | 7.62     | 7.25     | 7.25     |
| DO               | mgO2/L    | 0.00     | 0.00     | 0.00     |

Elaborado por: Autores

Los resultados de la tabla 11 indican las concentraciones de los diferentes constituyentes en el digester anaerobio, el cual estabiliza el caudal del tratamiento previo de lodos activados (sedimentar primario, tanque de aireación y sedimentador secundario), arrojando concentraciones en los constituyentes de nitrógeno amoniacal de 1 mgN/L y demanda química de oxígeno de 449.32 mg/L, concentraciones obtenidas a través del flujo de 40 m<sup>3</sup>/d que entra al digester anaerobio.

### 3.2.2.2 Tanque de aireación (nitrificación).



**Figura 17.** Tanque de Nitrificación, elaborado por: Autores mediante GPS-X

Una vez tratada el agua en el digester anaerobio se realiza una nitrificación parcial, donde se obtiene las siguientes concentraciones:

### Tabla 12.

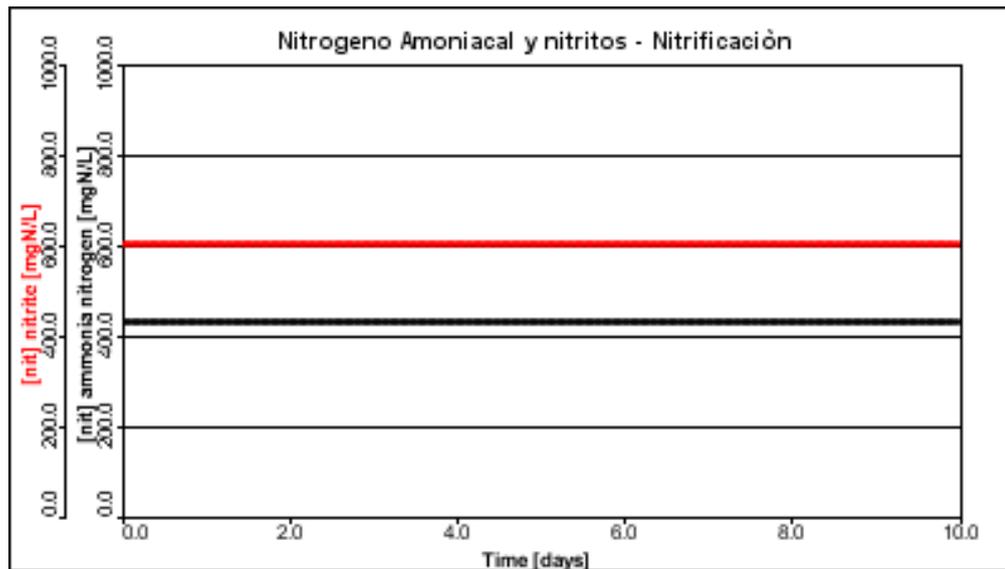
*Resultados obtenidos dentro del tanque de nitrificación*

| <b>Resultados de simulación</b> |            |          |          |         |
|---------------------------------|------------|----------|----------|---------|
|                                 |            | centrato | Internal | nit     |
| MLSS                            | mg/L       | 694.79   | 696.21   | 696.21  |
| MLVSS                           | mg/L       | 14.84    | 16.20    | 16.20   |
| Soluble COD                     | mg/L       | 8.32     | 0.91     | 0.91    |
| Ammonia N                       | mgN/L      | 1033.64  | 427.71   | 427.71  |
| Nitrite N                       | mgN/L      | 0.00     | 600.17   | 600.17  |
| Nitrate N                       | mgN/L      | 0.00     | 0.00     | 0.00    |
| Soluble PO4-P                   | mgP/L      | 555.36   | 555.41   | 555.41  |
| TP                              | mgP/L      | 555.85   | 555.88   | 555.88  |
| Total Alkalinity                | mgCaCO3/L  | 4338.75  | 2176.60  | 2176.60 |
| pH                              | -          | 7.34     | 5.81     | 5.81    |
| HRT                             | h          | -        | 9088.82  | -       |
| DO                              | mgO2/L     | -        | 2.00     | -       |
| Total OUR                       | mgO2/(L.h) | -        | 0.23     | -       |
| Nitrification                   |            |          |          |         |
| Rate                            | mgN/(L.h)  | -        | 0.07     | -       |
| Nitrate Util.                   |            |          |          |         |
| Rate                            | mgN/(L.h)  | -        | 0.00     | -       |
| Total Air Flow                  | m3/h       | -        | 87.41    | -       |
| SOTE                            | %          | -        | 30.00    | -       |
| Actual OTR                      | kg/h       | -        | 3.33     | -       |

Elaborado por: Autores

la tabla 12 presenta las concentraciones de los constituyentes dentro del tranque de nitrificación, esta información permite evidenciar el comportamiento expuesto del proceso Anammox, además en la figura 18 se presenta una concentración de nitritos de 600.17 mgN/L producida a partir de la nitrificación parcial del amonio, la cual se empleará como agente oxidante por las bacterias anammox en la oxido reducción formando nitrógeno gaseoso, además se evidencia disminución en la concentración del nitrógeno amoniacal con un valor de 427.71 mgN/L.

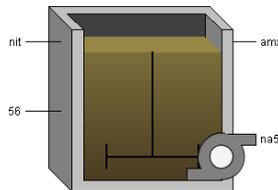
## Oxidación anaerobia del amoniaco



**Figura 18.** Concentración de nitrógeno amoniacal y nitritos dentro del tanque de Nitrificación, elaborado por: Autores por medio de GPS-X

### 3.2.2.3 Tanque Anammox.

Resultados de la oxidación anaerobia de amoniaco en un tanque Anammox



**Figura 19.** Tanque Anammox, elaborado por: Autores por medio de GPS-X

**Tabla 13.**

*Resultados de la simulación en el tanque anammox*

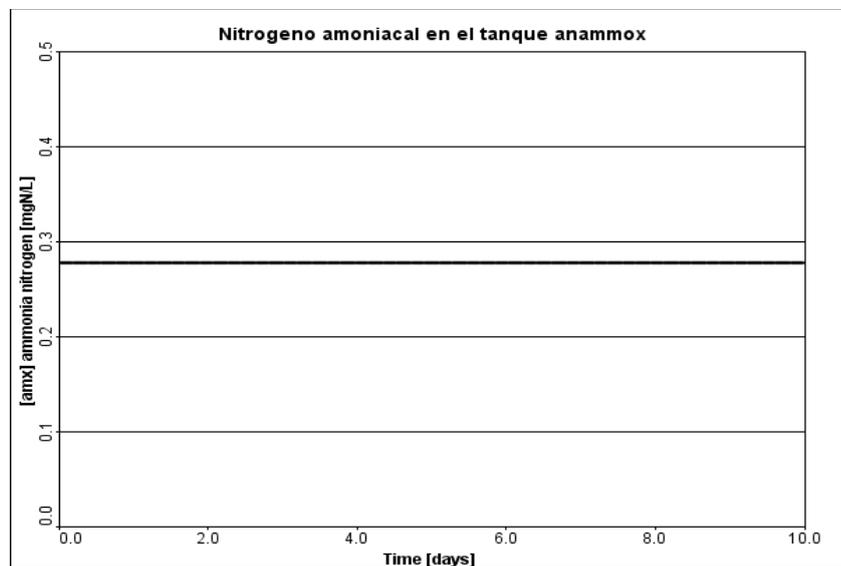
| <b>Resultados de simulación</b> |       |        |          |         |
|---------------------------------|-------|--------|----------|---------|
|                                 |       | nit    | Internal | amx     |
| MLSS                            | mg/L  | 696.31 | 2362.71  | 2362.71 |
| MLVSS                           | mg/L  | 16.20  | 90.28    | 90.28   |
| Soluble COD                     | mg/L  | 0.91   | 1.61     | 1.61    |
| Ammonia N                       | mgN/L | 427.65 | 0.28     | 0.28    |
| Nitrite N                       | mgN/L | 600.08 | 32.46    | 32.46   |
| Nitrate N                       | mgN/L | 0.00   | 96.52    | 96.52   |

## Oxidación anaerobia del amoniaco

|                    |            |         |         |        |
|--------------------|------------|---------|---------|--------|
| Soluble PO4-P      | mgP/L      | 555.63  | 555.11  | 555.11 |
| TP                 | mgP/L      | 556.10  | 557.57  | 557.57 |
| Total Alkalinity   | mgCaCO3/L  | 2176.29 | 305.67  | 305.67 |
| pH                 | -          | 5.81    | 6.64    | 6.64   |
| HRT                | h          | -       | 8907.05 | -      |
| DO                 | mgO2/L     | -       | 0.01    | -      |
| Total OUR          | mgO2/(L.h) | -       | 0.00    | -      |
| Nitrification Rate | mgN/(L.h)  | -       | 0.05    | -      |
| Nitrate Util. Rate | mgN/(L.h)  | -       | 0.00    | -      |

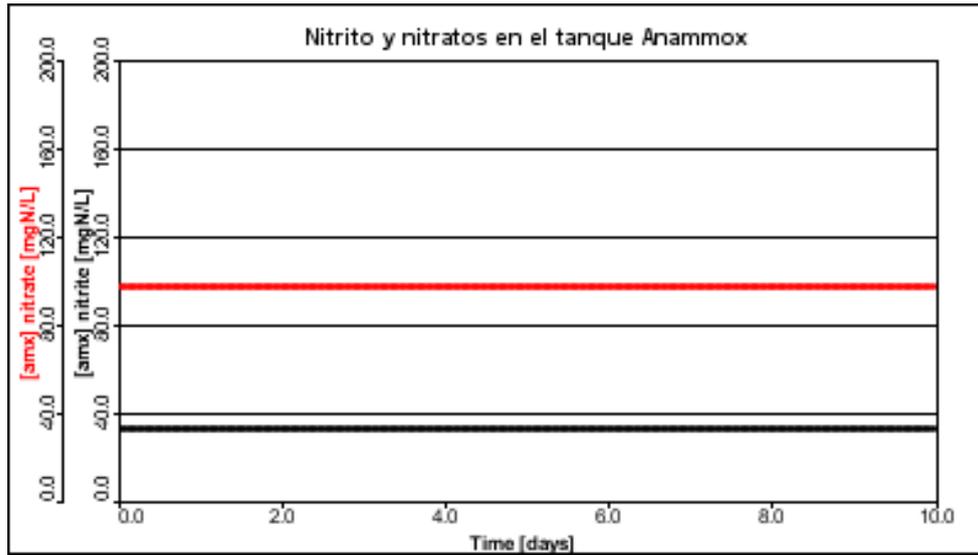
Elaborado por: Autores

La tabla 13 presenta los resultados de las concentraciones obtenidas dentro del tanque Anammox, se evidencia la oxidación tanto del nitrógeno amoniacal al pasar de una concentración de 427.65 mgN/L en el tanque anaerobio a una concentración de 0.28 mgN-/L en el tanque anammox, además de una oxidación de nitrito de 32.46 mgN/L como se observa en la figura 20 y figura 21



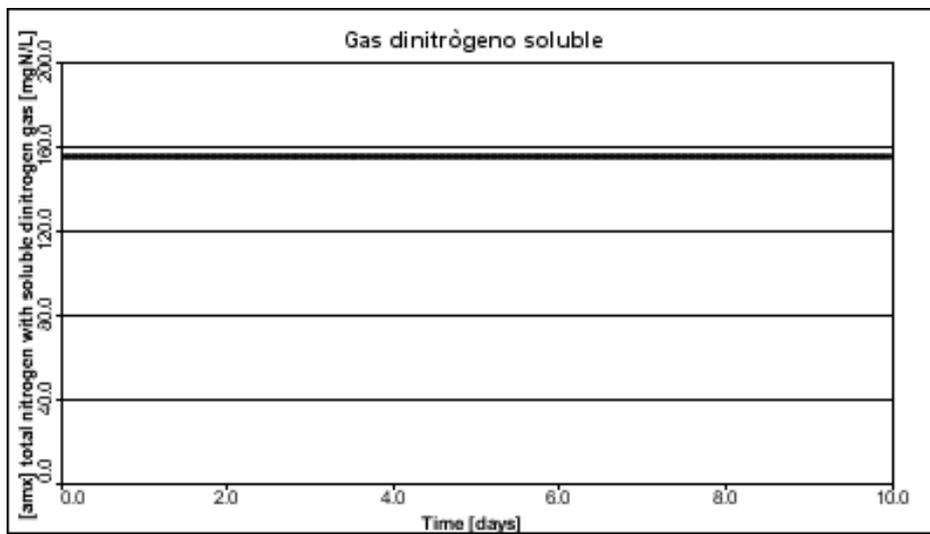
**Figura 20.** Concentración de nitrógeno amoniacal en el tanque Anammox, elaborado por: Autores por medio de GPS-X

## Oxidación anaerobia del amoníaco



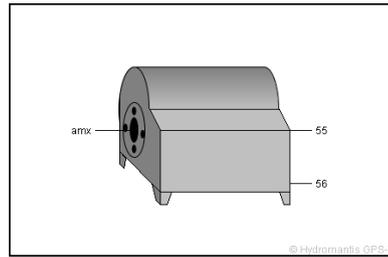
**Figura 21.** Concentración de nitritos y nitratos en el tanque Anammox, elaborado por: Autores por medio de GPS-X

Adicionalmente a esto se evalúa la concentración de gas di nitrógeno soluble en el reactor anaerobio, ya que nos da una aproximación a la cantidad de nitrógeno gaseoso que se produce por la oxidación de los nitritos, donde la concentración arroja un valor de 154.7 mg/l en el tanque anammox como se muestra en la figura 22.



**Figura 22.** Gas di nitrógeno soluble en el tanque anammox, elaborado por: Autores por medio de GPS-X.

### 3.2.2.4 Centrifuga.



**Figura 23.** Pantalla múltiple, elaborado por: Autores por medio de GPS-X

**Tabla 14.**

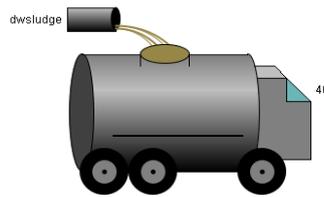
*Resultado de las concentraciones obtenidas dentro del tambor de pantallas múltiples*

| <b>Resultados de simulación</b> |           |         |        |          |
|---------------------------------|-----------|---------|--------|----------|
|                                 |           | Amx     | 55     | 56       |
| Flow                            | m3/d      | 39.29   | 38.50  | 0.79     |
| TSS                             | mg/L      | 2362.36 | 720.15 | 82830.93 |
| COD                             | mg/L      | 133.22  | 55.03  | 3964.54  |
| Ammonia N                       | mgN/L     | 0.28    | 0.28   | 0.28     |
| Soluble PO4-P                   | mgP/L     | 554.89  | 554.89 | 554.89   |
| TP                              | mgP/L     | 557.35  | 555.88 | 629.25   |
| Total Alkalinity                | mgCaCO3/L | 305.68  | 305.68 | 305.68   |
| pH                              | -         | 6.64    | 6.64   | 6.64     |
| DO                              | mgO2/L    | 0.01    | 0.01   | 0.01     |

Elaborado por: Autores

La tabla 14 presenta los resultados de la concentración de los constituyentes dentro del tambor de pantallas difusas, en el cual se separan los lodos de excesos los cuales contienen semilla de anammox con una concentración de 2362.36 mg/L y se dirigen al tanque anaerobio para ser utilizados en el proceso anammox, además el agua saliente se reintegra nuevamente al proceso inicial en el sedimentador primario.

### 3.2.2.5 Lodos.



**Figura 24.** Disposición de lodos, elaborado por: Autores de GPS-X

**Tabla 15.**

*Resultados obtenidos dentro de los lodos de exceso*

| Resultados de simulación |                        |  | Dwsludge  |
|--------------------------|------------------------|--|-----------|
| Flow                     | m <sup>3</sup> /d      |  | 1.50      |
| TSS                      | mg/L                   |  | 352722.99 |
| VSS                      | mg/L                   |  | 7536.31   |
| cBOD5                    | mg/L                   |  | 1917.37   |
| COD                      | mg/L                   |  | 11202.40  |
| Ammonia N                | mgN/L                  |  | 1033.64   |
| Nitrite N                | mgN/L                  |  | 0.00      |
| Nitrate N                | mgN/L                  |  | 0.00      |
| TKN                      | mgN/L                  |  | 1793.42   |
| TN                       | mgN/L                  |  | 1793.42   |
| Soluble PO4-P            | mgP/L                  |  | 555.36    |
| TP                       | mgP/L                  |  | 800.78    |
| Total Alkalinity         | mgCaCO <sub>3</sub> /L |  | 4338.75   |
| pH                       | -                      |  | 7.34      |
| DO                       | mgO <sub>2</sub> /L    |  | 0.00      |

Elaborado por: Autores

En la tabla 15 se presenta los resultados de las concentraciones que se disponen dentro de los lodos, los cuales son un subproducto de todo el proceso de tratamiento biológico de las aguas residuales, donde se puede evidenciar una concentración de sólidos suspendidos

## Oxidación anaerobia del amoniaco

totales de 352722.99 mg/l. entre los cuales se encuentra diferentes tipos de microorganismo a diferentes concentraciones como se muestra en la tabla 16.

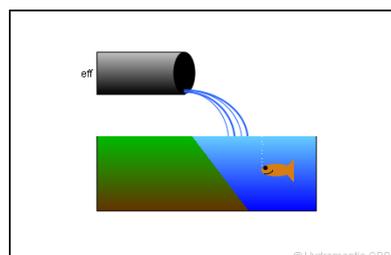
**Tabla 16.**

*Resultados de las concentraciones obtenidas de la Biomasa*

| <b>Variable</b>                                    | <b>Unit</b> | <b>Value</b> |
|--|-------------|--------------|
| <b>[amx] ammonia oxidizer biomass</b>              | mgCOD/L     | 0.03656      |
| <b>[amx] nitrite oxidizer biomass</b>              | mgCOD/L     | 4,50E-04     |
| <b>[amx] phosphate accumulating biomass</b>        | mgCOD/L     | 1,79E-03     |
| <b>[amx] fermenting biomass</b>                    | mgCOD/L     | 0.0009545    |
| <b>[amx] acetogenic biomass</b>                    | mgCOD/L     | 6,58E-03     |
| <b>[amx] acetoclastic methanogenic biomass</b>     | mgCOD/L     | 0.002155     |
| <b>[amx] hydrogenotrophic methanogenic biomass</b> | mgCOD/L     | 0.009264     |
| <b>[amx] methylotrophic biomass</b>                | mgCOD/L     | 1,65E-04     |
| <b>[amx] Anammox biomass</b>                       | mgCOD/L     | 39.52        |

Elaborado por: Autores

### 3.2.2.6. Efluente.



**Figura 25.** Efluente del sistema, elaborado por: Autores por medio de GPS-X

**Tabla 17.***Resultados de las concentraciones obtenidas del efluente del sistema*

| <b>Resultados de simulación</b> |                        |  | Eff      |
|---------------------------------|------------------------|--|----------|
| Flow                            | m <sup>3</sup> /d      |  | 38878.50 |
| TSS                             | mg/L                   |  | 597.08   |
| VSS                             | mg/L                   |  | 275.77   |
| cBOD5                           | mg/L                   |  | 232.24   |
| COD                             | mg/L                   |  | 422.48   |
| Ammonia N                       | mgN/L                  |  | 9.72     |
| Nitrite N                       | mgN/L                  |  | 0.00     |
| Nitrate N                       | mgN/L                  |  | 0.01     |
| TKN                             | mgN/L                  |  | 38.96    |
| TN                              | mgN/L                  |  | 38.97    |
| Soluble PO <sub>4</sub> -P      | mgP/L                  |  | 13.03    |
| TP                              | mgP/L                  |  | 21.78    |
| Total Alkalinity                | mgCaCO <sub>3</sub> /L |  | 229.47   |
| pH                              | -                      |  | 7.58     |
| DO                              | mgO <sub>2</sub> /L    |  | 2.00     |

Elaborado por: Autores

Una vez realizado el proceso de remoción de las concentraciones de contaminantes en el agua cruda (tabla 17) por medio de los procesos planteados de lodos activados y anammox, se evalúa la concentración de nitrógeno amoniacal en el efluente, con una concentración de 9.72 mg-N/L, una concentración de nitritos y nitratos de 0.0001 mg/l y de 0.01 mg/l respectivamente, además de evaluar la concentración de DBO y DQO con el fin de saber cuál es la remoción en cuanto a carga orgánica y se obtuvieron concentraciones de 432.24 mg/l y de 422.48 mg/l respectivamente.

### 3.3. Eficiencia del proceso Anammox

#### 3.3.1. Eficiencia del proceso anammox basados en los resultados del modelo de las condiciones operativas reales de Tunja

Para determinar la eficiencia del proceso anammox se toman las concentraciones obtenidas en el tanque anammox y en el efluente y de esta manera determinar si es viable emplear dicho proceso para el tratamiento de las aguas residuales en la ciudad de Tunja, teniendo en cuenta el dimensionamiento de las estructuras de la PTAR actuales, basados en la siguiente ecuación.

$$Eficiencia (\%) = \frac{C_i - C_s}{C_i} * 100$$

Donde:

C<sub>i</sub>= Concentración inicial en el afluente

C<sub>s</sub>=Concentración saliendo

##### 3.3.1.1 Eficiencia de remoción del amoníaco en el tanque anammox.

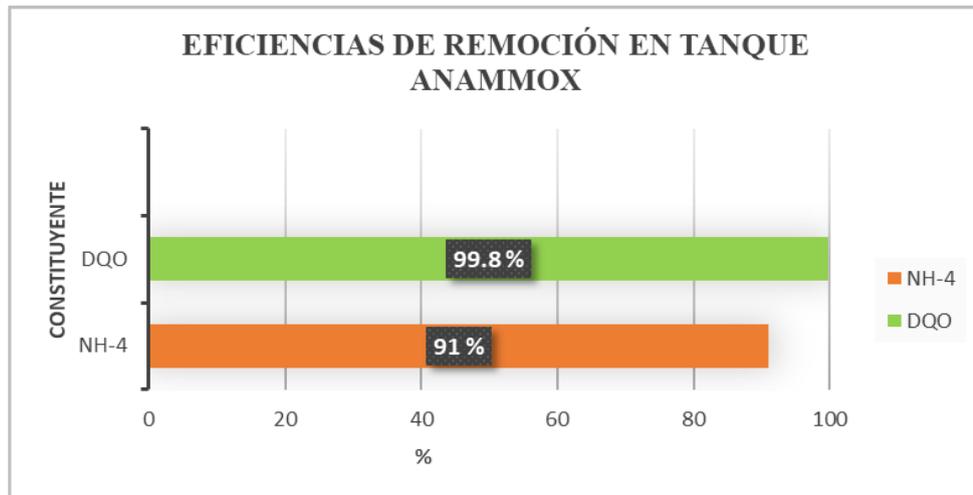
$$\varepsilon_{NH_4} = \frac{20 \text{ mg} \frac{NH_4}{l} - 1.82 \text{ mg} \frac{NH_4}{l}}{20 \text{ mg} \frac{NH_4}{l}} * 100$$

$$\varepsilon_{NH_4} = 91 \%$$

##### 3.3.1.2 Eficiencia de remoción de la DQO.

$$\varepsilon_{DQO} = \frac{752 \text{ mg} \frac{DQO}{l} - 1.36 \text{ mg} \frac{DQO}{l}}{752 \text{ mg} \frac{DQO}{l}} * 100$$

$$\varepsilon_{DQO} = 99.8 \%$$



**Figura 26.** Eficiencias de remoción en los constituyentes en el tanque anammox, elaborado por: Autores

### 3.3.1.3. Eficiencia de remoción del amoníaco evaluada en el efluente.

$$\varepsilon_{NH_4} = \frac{20 \text{ mg} \frac{NH_4}{l} - 21.5 \text{ mg} \frac{NH_4}{l}}{20 \text{ mg} \frac{NH_4}{l}} * 100$$

$$\varepsilon_{NH_4} = 0 \%$$

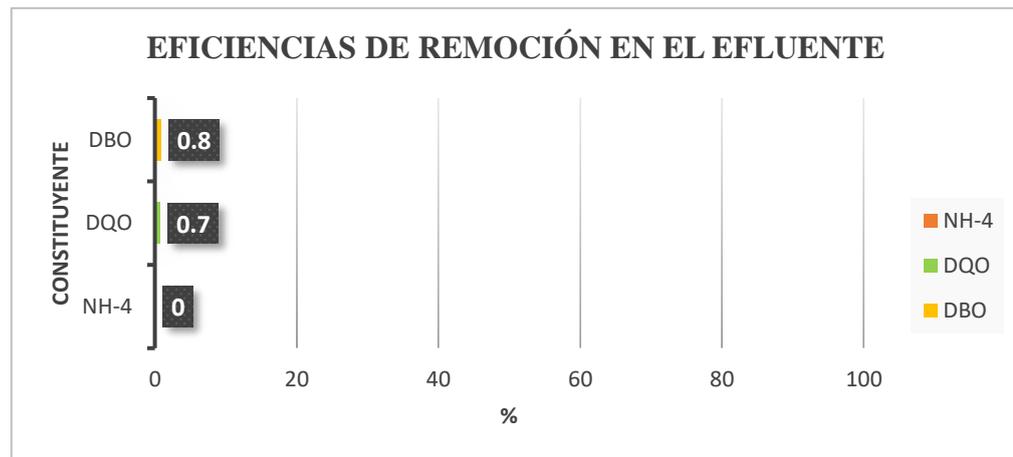
### 3.3.1.4 Eficiencia de remoción de DBO y DQO.

$$\varepsilon_{DQO} = \frac{752 \text{ mg} \frac{DQO}{l} - 746.8 \text{ mg} \frac{DQO}{l}}{752 \text{ mg} \frac{DQO}{l}} * 100$$

$$\varepsilon_{DQO} = 0.7 \%$$

$$\varepsilon_{DBO} = \frac{537 \text{ mg} \frac{DBO}{l} - 532.5 \text{ mg} \frac{DBO}{l}}{537 \text{ g} \frac{DBO}{l}} * 100$$

$$\varepsilon_{DBO} = 0.8 \%$$



**Figura 27.** Eficiencias de remoción en los constituyentes en el efluente, elaborado por: Autores

### 3.3.2. Eficiencia del proceso anammox basados en los resultados del modelo con tiempo hidráulico de retención de 9 horas.

Para determinar la eficiencia del proceso de anammox cuando se tiene un tiempo hidráulico de retención de 9 horas, se calcula la eficiencia en el tanque anammox y en el efluente, para así determinar si es viable emplear dicho proceso para el tratamiento de las aguas residuales en la ciudad de Tunja, con un cambio en las dimensiones de las estructuras de cada uno de los procesos.

#### 3.3.2.1 Eficiencia de remoción del amoníaco en el tanque anammox.

$$\varepsilon_{NH_4} = \frac{20 \text{ mg} \frac{NH_4}{l} - 0.28 \text{ mg} \frac{NH_4}{l}}{20 \text{ mg} \frac{NH_4}{l}} * 100$$

$$\varepsilon_{NH_4} = 98.6 \%$$

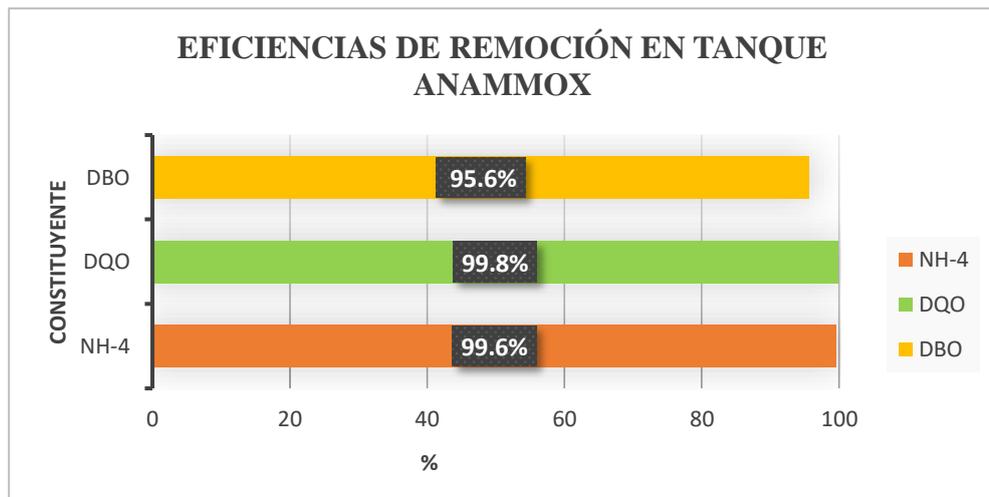
#### 3.3.2.2 Eficiencia de remoción de la DBO y DQO.

$$\varepsilon_{DDQO} = \frac{752 \text{ mg} \frac{DQO}{l} - 1.61 \text{ mg} \frac{DQO}{l}}{752 \text{ mg} \frac{DQO}{l}} * 100$$

$$\varepsilon_{DDQO} = 99.8 \%$$

$$\varepsilon_{DBO} = \frac{537 \text{ mg} \frac{DBO}{l} - 23.63 \text{ mg} \frac{DBO}{l}}{537 \text{ g} \frac{DBO}{l}} * 100$$

$$\varepsilon_{DBO} = 95.6 \%$$



**Figura 28.** Eficiencias de remoción en los constituyentes en el tanque anammox, elaborado por: Autores

### 3.3.2.3. Eficiencia de remoción del amoníaco evaluada en el efluente.

$$\varepsilon_{NH_4} = \frac{20 \text{ mg} \frac{NH_4}{l} - 9.72 \text{ mg} \frac{NH_4}{l}}{20 \text{ mg} \frac{NH_4}{l}} * 100$$

$$\varepsilon_{NH_4} = 51,4 \%$$

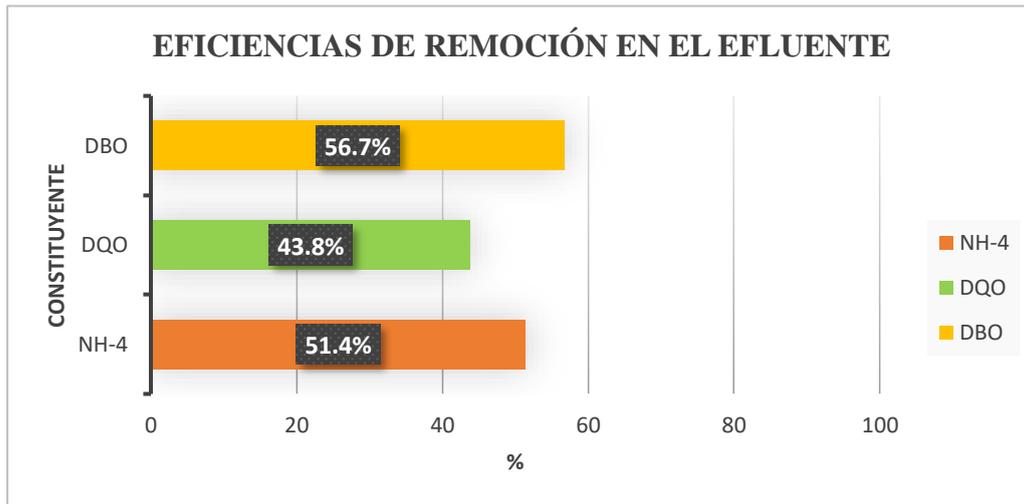
### 3.3.2.4 Eficiencia de remoción de la DBO y DQO.

$$\varepsilon_{DQO} = \frac{752 \text{ mg} \frac{DQO}{l} - 422.48 \text{ mg} \frac{DQO}{l}}{752 \text{ mg} \frac{DQO}{l}} * 100$$

$$\varepsilon_{DQO} = 43.8 \%$$

$$\varepsilon_{DBO} = \frac{537 \text{ mg } \frac{DBO}{l} - 232.24 \text{ mg } \frac{DBO}{l}}{537 \text{ g } \frac{DBO}{l}} * 100$$

$$\varepsilon_{DBO} = 56.7 \%$$



**Figura 29.** Eficiencias de remoción en los constituyentes en el efluente, elaborado por: Autores

Teniendo en cuenta lo presentado anteriormente se evidencia que el proceso anammox es una alternativa potencialmente viable para implementar dentro del tratamiento de las aguas residuales de la ciudad de Tunja, ya que bajo las condiciones iniciales y una simulación en estado estacionario, el modelo indica una eficiencia de remoción del amoníaco y carga orgánica en el tanque anammox del 91% y 99.8 % respectivamente, para el dimensionamiento planteado que corresponde a las estructuras actuales de la PTAR de Tunja. Así mismo se evaluó la eficiencia bajo un volumen ideal de 14580 m<sup>3</sup>, del cual se obtuvieron porcentajes de remoción en el tanque anammox del 99.6 % para el amoníaco, de 99.8 % para la remoción de DQO y de 95.6% en la remoción de la DBO, la diferencia radica en que para el volumen de las condiciones reales de la PTAR de Tunja se presenta un tiempo hidráulico de retención de 1768.5 horas para obtener dicha eficiencia, aumentando el tiempo de transformación de los contaminantes, conllevando a un aumento en los costos de operación y mantenimiento, mientras que para el volumen de 14580 m<sup>3</sup> se lleva a cabo el proceso dentro de un tiempo hidráulico de retención de 9 horas.

## Oxidación anaerobia del amoníaco

Al evaluar la eficiencia de remoción del amoníaco y carga orgánica con respecto al afluente bajo condiciones reales de operación se obtuvieron unas eficiencias de remoción del 0 % para el amoníaco, del 0.7 % para la DQO y del 0.8% para la DBO, indicando que el agua del efluente tiene casi la misma concentración inicial, esto se debe a que el efluente proviene del proceso de lodos activados que trata las aguas del afluente y de la recirculación del agua resultante de la centrifuga, donde este proceso tiene la función de remover la materia orgánica, por lo tanto se infiere que el proceso de lodos activados no tiene la suficiente capacidad de remover dichos contaminantes con el dimensionamiento actual. Por otra parte, con el volumen ideal se obtuvieron eficiencias evaluadas en el efluente del 51.4% para el amoníaco, del 43.8% para la DQO y del 56.7 % para la DBO, indicando que se remueve parcialmente la concentración de dichos contaminantes, debido a que se presenta una mezcla entre el afluente y el caudal de recirculación, es decir que cierta fracción del caudal es vertida sin el tratamiento del anammox.

## Conclusiones

La revisión bibliográfica permite identificar que la aplicación del proceso anammox a gran escala, presenta beneficios de optimización y reducción del impacto negativo sobre el medio ambiente, luego de un tiempo determinado para el arranque de la semilla anammox se obtienen porcentajes de eficiencia más elevados en comparación a los procesos convencionales de nitrificación y desnitrificación, así mismo se ve reflejado en la disminución de costos de operación y mantenimiento, convirtiendo la oxidación anaerobia del amoníaco un proceso rentable y sostenible en la aplicación dentro del campo de la ingeniería para el tratamiento de las aguas residuales con alto contenido de nitrógeno amoniacal.

La ciudad de Tunja en su extensión produce aguas residuales domesticas las cuales son vertidas al rio “Jordán” para su posterior tratamiento en la planta de aguas residuales de Veolia, donde la caracterización del agua cruda está compuesta por concentraciones de DBO, DQO, nitritos, nitratos, solidos suspendidos totales, fosforo, coliformes totales, entre otros, los cuales se busca remover por medio de un proceso biológico y a su vez actúan como fuente de carbono y energía para la aplicación del proceso anammox.

Mediante el software de GPS-X se modeló el sistema de tratamiento con el proceso anammox, donde las variables que alimentan el modelo corresponden a las condiciones y concentraciones de los constituyentes del agua cruda de la ciudad de Tunja, con un esquema que comprende un tratamiento inicial de lodos activados y posteriormente el proceso anammox, para ello se realizó un simulación con el caudal y volumen con el que opera actualmente la PTAR de Tunja, donde se tiene un tiempo hidráulico de retención de 1768.5 horas con una eficiencia de remoción de 99.8% del nitrógeno amoniacal en el tanque anammox y para un tiempo de retención de 9 horas con un volumen de 14580 m<sup>3</sup> en estado estacionario se obtuvo un eficiencia de remoción de nitrógeno amoniacal y DBO en el reactor anammox de 98.6% y 95.6% respectivamente.

A partir de la revisión bibliográfica y el planteamiento del modelo del proceso anammox, se puede evidenciar que esta tecnología a pesar de ser relativamente nueva, ofrece una alternativa viable y sostenible para sustituir los procesos convencionales que se llevan a cabo actualmente en el tratamiento de las aguas residuales, como la nitrificación y

desnitrificación, identificando la ventajas de la aplicación de dicha tecnología y su potencial aplicación en plantas de aguas residuales domesticas en las grandes ciudades como se muestra en la siguiente figura.

| Item                                 | Unit          | Conventional | Pre-treatment,<br>Anaerobic treatment,<br>Anammox | Difference |
|--------------------------------------|---------------|--------------|---|------------|
| Energy production (CH <sub>4</sub> ) | MW            | 0            | 40  | 40         |
| CO <sub>2</sub> emission             | kton /year    | 400          | 6   | 394        |
| Power consumption                    | MW            | 80           | 41  | 39         |
| Sludge production                    | ktonVSS /year | 370          | 270   | 100        |

**Figura 30.** Comparación de los beneficios de la implementación del proceso convencional y Anammox, tomado de: Henze., Mark., Ekama & Brdjanovic, 2008.

La planta de tratamiento de agua residual de la ciudad de Tunja, busca por medio de su proceso de tratamiento remover hasta un 80% la carga contaminante, mientras que el modelo planteado en condiciones ideales presenta eficiencias de alrededor del 51% para la remoción de nitrógeno amoniacal, evidenciando que, si bien el proceso anammox presenta mayores beneficios ambientales y económicos la plata de tiramiento en condiciones operativas tiene una proyección de remoción mucho mayor.

El desarrollo e implementación de softwares ha sido de gran importancia en el área de la ingeniería, ya que permite conocer cuál será el comportamiento de determinado escenario a diferentes condiciones, GPS-X es una herramienta que ayuda a la toma de decisiones frente a la aplicabilidad de diferentes procesos biológicos para el tratamiento de las aguas residuales con el análisis de diferentes variables de estado.

### **Recomendaciones**

Una vez planteado el esquema del proceso anammox se recomienda tener un control de las variables de estado que influyen en el correcto funcionamiento del proceso dentro del reactor anaerobio, como lo es la temperatura, pH, Conductividad, Concentración de oxígeno disuelto, nutrientes, entre otras y de esta manera optimizar el proceso para la remoción del nitrógeno amoniacal. Además de tener un adecuado tratamiento y disposición de los lodos producto del proceso, ya que estos se convierten en un pasivo ambiental. Por otra parte, se puede correr el modelo en un estado dinámico y de esta manera observar cual es el comportamiento del amoníaco dentro del tanque anammox hasta alcanzar el estado estacionario, modificando las variables de estado y las condiciones iniciales del modelo, para determinar a qué condiciones se logra una mayor eficiencia.

El modelo planteado está diseñado para el correcto funcionamiento y aplicación bajo un tiempo ideal de retención hidráulica de 9 horas, el cual es necesario para que las bacterias anammox realicen la transformación del nitrógeno amoniacal, sin embargo al evaluar el modelo con las condiciones reales se obtienen eficiencias similares dentro del tanque anammox, pero estas eficiencias disminuyen cuando se evalúan las condiciones operativas reales en el efluente, por lo tanto si se desea implementar el proceso anammox dentro del tratamiento es necesario un redimensionamiento de las estructuras para que se presenten mayores eficiencias de remoción.

Por lo tanto, si se pretende implementar el proceso anammox dentro del sistema de tratamiento del agua residual de la ciudad de Tunja, es necesario realizar un estudio de factibilidad que determine la viabilidad de implementar el proceso anammox en el tren de tratamiento, teniendo en cuenta que para obtener una eficiencia adecuada en la remoción del nitrógeno amoniacal, se debe hacer un redimensionamiento de las estructuras con las que cuenta la PTAR actualmente, lo que se representa en mayores costos de inversión, a pesar de que esta tecnología presenta mayores beneficios en cuanto a la reducción del amonio, costos operativos, costos de mantenimiento, menor producción de subproductos como los lodos provenientes del tratamiento, gas metano y CO<sub>2</sub>.

### Referencias

- Bilge, A. K., Dityapak, D., Semerci, N., Keklik, E., & Alper Akarsubası. (2018). Anammox start-up strategies: The use of local mixed activated sludge seed versus anammox seed. *Water Science and Technology*, 78(9), 1901-1915. doi: <http://dx.doi.org/10.2166/wst.2018.431>
- Contreras, Y & Garcia, M, (2005). *Gestión del agua, planta de tratamiento de agua residuales- Tunja*. Recuperado de: [https://iuc.eu/fileadmin/user\\_upload/Regions/iuc\\_lac/user\\_upload/ESP\\_Tunja -  
Planta de tratamiento de aguas residuales-PTAR.pdf](https://iuc.eu/fileadmin/user_upload/Regions/iuc_lac/user_upload/ESP_Tunja_-_Planta_de_tratamiento_de_aguas_residuales-PTAR.pdf)
- García, O. N. (2006). Lodos residuales: estabilización y manejo. *Caos conciencia*, 1(1), 51-58. Recuperado de: [http://dci.uqroo.mx/RevistaCaos/2006\\_Vol\\_1/Num\\_1/NO\\_Vol\\_I\\_21-30\\_2006.pdf](http://dci.uqroo.mx/RevistaCaos/2006_Vol_1/Num_1/NO_Vol_I_21-30_2006.pdf)
- Gerardi, M. H. (2003). *Nitrification and denitrification in the activated sludge process*. John Wiley & Sons.
- GRAF. (2018) *Sustainable Solutions for Water Management*. Recuperado de: <https://www.grafiberica.com/>
- Henze, M., Mark, C., Ekama, G & Brdjanovic, D. (2008). *Biological Wastewater Treatment Principles, Modelling and Design*
- Knowles, R. (1982). Denitrification. *Microbiological reviews*, 46(1), 43-70. Recuperado de: <https://journals.asm.org/doi/pdf/10.1128/mr.46.1.43-70.1982>
- Krakat, N., Demirel, B., Anjum, R., & Dietz, D. (2017). Methods of ammonia removal in anaerobic digestion: a review. *Water Science and Technology*, 76(8), 1925-1938. recuperado de: <https://doi.org/10.2166/wst.2017.406>
- Kuenen, J. (2008). Anammox bacteria: from discovery to application. *Nat Rev Microbiol* 6,320–326. Recuperado de: <https://doi.org/10.1038/nrmicro1857>
- Kun, E., & Kearney, E. B. (1974). Ammonia. In *Methods of enzymatic analysis* (pp. 1802-1806). Academic Press. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-091304-6.50031-8>
- Mulder, A., Van de Graaf, A. A., Robertson, L. A., & Kuenen, J. G. (1995). Anaerobic ammonium oxidation discovered in a denitrifying fluidized bed reactor. *FEMS microbiology ecology*, 16(3), 177-183. Recuperado de:

<https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.1995.tb00281.x>

Natural Human Genome research institute. Bacteria. Recuperado en: 20 de septiembre, <https://www.genome.gov/es/genetics-glossary/Bacteria>

Peng, Y., Zhu, G. (2006). Biological nitrogen removal with nitrification and denitrification via nitrite pathway. *Appl Microbiol Biotechnol* 73, 15–26. Recuperado de: <https://doi.org/10.1007/s00253-006-0534-z>.

Prihandrijanti, M., & Firdayati, M. (2011). Current situation and considerations of domestic wastewater treatment systems for big cities in Indonesia (Case study: Surabaya and Bandung). *Journal of Water sustainability*, 1(2) 97-104. Recuperado de: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.1056.1878&rep=rep1&type=pdf>

READCIVIL (2019). *Main Terms and Definitions in Waste Water Engineering*. Recuperado de: <https://readcivil.com/main-terms-and-definitions-in-waste-water-engineering/>

ROJAS, M., JAIMES, L & VALENCIA, M. (2017). Effectiveness, efficacy and efficiency in teamworks. Vol 39. Recuperado de: <https://www.revistaespacios.com/a18v39n06/a18v39n06p11.pdf>

Salazar, B. (2017). Proceso industrial. Recuperado de: <https://www.ingenieriaindustrialonline.com/procesos-industriales/que-es-un-proceso-industrial/>

Sanabria, J., Bedoya, L., Sánchez, J. (2009). *PROCESO ANAMMOX UNA APLICACIÓN EN INGENIERÍA: REVISIÓN GENERAL DE LOS ASPECTOS MICROBIANOS*. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, (8), 83-92. [Fecha de Consulta 17 de Septiembre de 2021]. ISSN: 1692-9918. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=231116390010>

Schmidt, I., Sliemers, O., Schmid, M., Bock, E., Fuerst, J., Kuenen, J. G., ... & Strous, M. (2003). New concepts of microbial treatment processes for the nitrogen removal in wastewater. *FEMS microbiology reviews*, 27(4), 481-492. Recuperado de: [https://doi.org/10.1016/S0168-6445\(03\)00039-1](https://doi.org/10.1016/S0168-6445(03)00039-1)

Schmidt, I., Sliemers, O., Schmid, M., Cirpus, I., Strous, M., Bock, E., ... & Jetten, M. S. (2002). Aerobic and anaerobic ammonia oxidizing bacteria—competitors or natural partners?. *FEMS microbiology ecology*, 39(3), 175-181. recuperado

## Oxidación anaerobia del amoníaco

de:<https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2002.tb00920.x>

- Speth, D., in 't Zandt, M., Guerrero-Cruz, S. et al (2016). Genome-based microbial ecology of anammox granules in a full-scale wastewater treatment system. *Nat Commun* 7, 11172. Recuperado de: <https://doi.org/10.1038/ncomms11172>
- Stauffer, B & Spuhler, D. (2020). *Anammox*. Recuperado de: <https://sswm.info/es/water-nutrient-cycle/wastewater-treatment/hardwares/semi-centralised-wastewater-treatments/anammox>
- Strous, M., Gerven, E., Ping, J. Gijs, K., & Jetten, M. (1997): Ammonium removal from concentrated waste streams with the anaerobic ammonium oxidation (Anammox) process in different reactor configurations, *Water Research*, Volume 31, Pages 1955-1962, ISSN 0043-1354. Recuperado de: [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(97\)00055-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(97)00055-9).
- The Indian Nitrogen Assessment. (2017). *Nitrification - Treatment and reuse of wastewater*.
- van Kessel, M., Speth, D., Albertsen, M. et al. (2015). Complete nitrification by a single microorganism. *Nature* **528**, 555–559. Recuperado de: <https://doi.org/10.1038/nature16459>
- Varela, G., & Grotiuz, G. (2008). Fisiología y metabolismo bacteriano. *Uruguay, Editorial Cefa*, 43-58. Recuperado de: <https://acortar.link/dgQmzD>
- Wei, Y., Jin, Y & Zhang, W. (2020). *Domestic Sewage Treatment Using a One-Stage ANAMMOX Process*. Recuperado de: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7246634/#B18-ijerph-17-03284>
- Wijaya, I. M. W., & Soedjono, E. S. (2018). Physicochemical characteristic of municipal wastewater in tropical area: case study of Surabaya City, Indonesia. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 135, No. 1, p. 012018). IOP Publishing. Recuperado de: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/135/1/012018/meta>
- Zarza, F. (2019) *Eutrofización - Calidad de Agua*. Recuperado de: <https://www.iagua.es/respuestas/que-es-eutrofizacion>