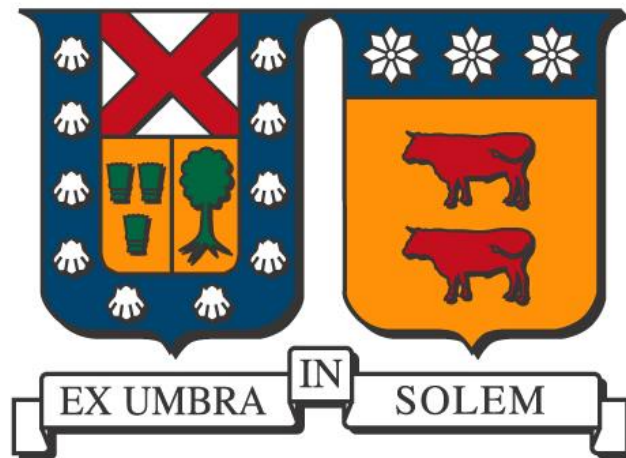


UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

DEPARTAMENTO DE QUIMICA Y MEDIO AMBIENTE

CONCEPCION – CHILE



**“ELIMINACION DE COMPUESTOS NITROGENADOS EN
AGUAS RESIDUALES MEDIANTE NITRIFICACION Y
DESNITRIFICACION”**

BASTIAN ALONSO PAREDES PAREDES

RODRIGO OSVALDO GARRIDO JARA

TRABAJO DE TITULACION PARA OPTAR AL TITULO DE **TÉCNICO
UNIVERSITARIO EN QUÍMICA, MENCIÓN QUÍMICA
INDUSTRIAL**

PROFESOR GUÍA: CRISTIAN PEREIRA.

Agosto - 2019

"Ninguna persona es una isla, entera por sí misma"
- John Donne

*Dedicado a todas las personas que me ayudaron a librarme del yugo de la
universidad.*

Agradecimientos:

Bastian Paredes

En primera instancia, agradecer en gran parte a la motivación que llegaba a mi ser de manera inesperada, una motivación que era la fuente principal de energía en los días más difíciles, motivación que me ayudo a terminar todo lo que me propuse a lo largo de estos dos años y medio los cuales fueron muy buenos como también muy duros, pero como un lobo supe adaptarme y seguir mi camino.

Agradecer de todo corazón a mi mamá que por muy enojona que sea me motivaba a intentar ser una mejor persona física y mentalmente, ella siempre fue, es y será la mujer que más se preocupaba por mí, siempre estuvo atenta de que yo tuviese todo lo necesario para que mi estancia en la universidad fuese lo más grato posible y sin esa preocupación todo habría sido distinto. En segundo lugar, agradecer a quien siempre ha sido mi tutor Luis Felipe Paredes Paredes, que se hizo cargo de todos los Paredes Paredes sin rechistar, sacrificio y entrego su adolescencia a trabajar sin miedo alguno al fracaso, es quien ayudo a construir cada semiento de lo que mi familia y yo somos hoy en día, sin eso no habríamos sido nada, agradecerle por cada consejo y por todas las caminatas de fin de semana que realizábamos cuando no teníamos nada que hacer, donde hablábamos de la vida y recordábamos los viejos tiempos que compartimos.

Dar las gracias a Daniela Belén Acevedo Paredes y Antonella Isidora Fierro Acevedo por ser las dos mujeres que mas mañas y enojos me hicieron pasar, a Daniela por apoyarme cuando nadie lo hacía sacándome una risa o entregándome una palabra de aliento y a Antonella Isidora por ser el angelito de mi vida que da vitalidad a toda la familia con sus mañas, risas y por ser lo mejor que me ha pasado hasta el momento.

Reconocer el importante hecho de haber conocido el 2018 a Angge Belén Carrasco Vera, que llego en el momento justo donde solo sentía soledad, ella se ha dedicado al 100% en recuperar la confianza en mí mismo, la confianza en las personas y conocer lo bueno que es el amor sano que ya hace mucho había desaparecido de mi vida, por eso y mucho mas ella se merece todo el amor que le entrego día a día.

Sin dejar fuera a quienes más me soporto en la universidad, dar las gracias a Madeling Bravo quien fue mi fiel compañera en estos dos años y medio, me acepto sin criticar ninguno de mis aspectos físicos y psicológicos, ella me podía escuchar todo el día las tonteras que hablaba y aun así seguía siendo mi buena amiga, gracias por hacer que todo este tiempo haya sido más agradable.

Obviamente agradecer a quien ha sido mi mejor amigo por 19 años, Iván Díaz, a pesar de que no hablemos el día a día siempre demuestra un poco de

preocupación por mi y está dispuesto a ayudarme a mi o a mi familia, sabe lo importante que es para mí terminar todo este proceso que el ultimo año ha sido problemático y estresante. Esperemos que la amistad siga aunque pasen 40 años porque amistades así de verdaderas no se encuentran a la vuelta de la esquina.

Rodrigo Garrido

Por mi parte, yo Rodrigo Garrido agradezco a mi mamá, por siempre creer que soy capaz, aún cuando yo no. A mi papá, por incentivarme a aprender y a los profesores comprometidos en formar profesionales competentes.

RESUMEN

El agua es el recurso más importante del planeta para toda forma de vida existente en la tierra, con la evolución del ser humano este suministro se fue viendo realmente afectado por el uso que conlleva el desarrollo y la vivencia humana el día a día. Aunque de primera vista no fue un tema de importancia para las industrias, el vertido de residuos en las aguas dulces y saladas comenzó a tener un efecto negativo para la fauna marina.

Principalmente, los desechos provenientes de industrias eran quienes causaban un mayor impacto a comparación de los residuos de origen municipal. Estos desechos que solían ser productos no deseados de procesos industriales tenían la particularidad de ser ricos en compuestos formados por Carbono, Nitrógeno, Fosforo y azufre.

Cuando salieron a la luz los primeros indicios de los problemas que estaban causando los residuos que terminaban desembocando en los efluentes de aguas dulces se comenzaron a tomar medidas, aunque en ese momento fueron realmente leves, para limitar el vertido de residuos industriales. Con el paso de los años esto ha ido tomando un peso mucho mayor y ha pasado a ser un tema que compete a todo el mundo, por lo tanto, se fueron desarrollando sistemas para poder limpiar las aguas contaminadas por compuestos nitrogenados, carbonados, fosforados o azufrados. Estos sistemas de limpieza fueron denominados sistemas de nitrificación y desnitrificación los cuales cumplen la tarea de disminuir las concentraciones de distintos productos contaminantes que ya fueron mencionados anteriormente. En un principio solo se basaban en la experimentación para ir desarrollando un sistema el cual fuera lo suficientemente eficiente para que las aguas se acomoden a un decreto en específico que vendría siendo el D.S 90, al menos para Chile.

Cuando los sistemas de eliminación de compuestos contaminantes en las aguas residuales llegaron a un punto culmine en donde se cumplían mayoritariamente las necesidades humanas para el vertido, se generaron decretos mucho más rigurosos y estrictos que, acompañados de los sistemas de eliminación de contaminantes, generaban el suficiente cuidado para poder depositar estas aguas ya tratadas en lagos, ríos y mares sin afectar a la fauna marina.

Este trabajo de título presenta los distintos aspectos de las aguas residuales enfocados en un contaminante en especial que viene siendo el nitrógeno, la razón de solo tomar en cuenta un solo elemento contaminante de los tantos que existen es porque su vertido indiscriminado hace que las aguas realmente mueran devastando de raíz todo tipo de fauna marina a su alrededor, explicaremos los distintos métodos para oxidar y reducir el nitrógeno volviéndolo un elemento totalmente nocivo que su presencia no tendrá mayor efecto en la vida terrestre, se expondrán y nombrarán distintos aspectos de un decreto en particular que se encarga del vertimiento de las aguas tratadas.

Índice

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS..... 1

1.1 Nitrificacion y Desnitrificacion como aspecto general..... 1

1.2 Objetivo general..... 4

1.2.1 Objetivos específicos..... 4

CAPITULO 2: MARCO TEORICO..... 5

2.1 Aguas residuales. 5

2.1.1 Definición de aguas residuales y factores de la contaminación..... 5

2.1.2 Normativa chilena: D.S 90 Ministerio del medio ambiente..... 9

2.2 Contaminación por compuestos nitrogenados..... 17

2.2.1 Presencia de nitrógeno contaminante en el medio ambiente 17

2.2.2 Ciclo del nitrógeno..... 18

2.3 Eliminación del nitrógeno del agua residual. 20

2.3.1 Nitrificacion y desnitrificación por organismos biológicos 20

2.3.1.1 Nitrificacion SHARON..... 24

2.3.1.2 Nitrificacion Parcial..... 24

2.3.1.3 Nitrificacion Anammox..... 25

2.3.1.4 Nitrificacion CANON..... 26

2.3.1.5 Nitrificacion SHARON + Anammox 27

2.3.1.6 Nitrificacion DEMON y OLAND..... 28

2.3.2 Factores que afectan a los distintos tipos de nitrificación. 30

2.3.2.1 Factor 1: pH..... 30

2.3.2.2 Factor 2: Temperatura..... 31

2.3.2.3 Factor 3: Concentracion de nitritos..... 32

2.3.2.4 Factor 4: Salinidad..... 33

2.3.3 Desnitrificacion biologica del nitrogeno..... 33

2.3.3.1 Desnitrificacion heterotrofa 35

2.3.3.2 Desnitrificacion autotrofa 38

2.3.3.3 Desnitrificacion autotrofa y heterotrofa de manera simultanea..... 41

CAPITULO 3: FUNCIONAMIENTO..... 43

3.1 Sistema Bardenpho 43

3.1.1 Impacto del pH en un sistema Bardenpho de cuatro y cinco etapas 44

3.1.1.1 Actividad microbiana en los distintos rangos de pH dentro de un biorreactor Bardenpho..... 44

3.2 Bardenpho de cuatro etapas.	51
3.2.1.1 Biorreactor uno: pre – anoxico	51
3.2.1.2 Biorreactor dos.....	52
3.2.1.3 Biorreactor tres: post - anoxico	53
3.2.1.4 Biorreactor cuatro.....	54
3.2.1.5 Biorreactor cinco para la eliminacion del fosforo.....	54
3.2.1 Inicio del tratamiento.....	51
3.2.2 Control de proceso	55
3.3 Conclusiones.....	56
3.4 Bibliografía	57
3.5 Anexo	59

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ciclo del nitrógeno. Fuente: Practical Wastewater Treatment, 2006.....	19
Figura 3: tipos de nitrificación	23
Figura 2: Pre - desnitrificación, sistema Ludzack - Ettinger. Fuente: Practical Wastewater Treatment, 2006.	23
Figura 4: Proceso de nitrificación sin la aplicación de la nitrificación parcial. Fuente: Campos et al JEB, 2009.....	25
Figura 5: Proceso de nitrificación parcial. Fuente: Campos et al JEB, 2009.	25
Figura 6: tipos de desnitrificación.	35
Figura 7: proceso de reducción del nitrato a nitrógeno gaseoso.	36
Figura 8: Proceso de Barnard, cuatro etapas.	43
Figura 9: actividad entre pH 4 y pH 5.....	45
Figura 10: actividad entre pH 4, pH 5 y pH 6.....	46
Figura 11: actividad entre pH 5, pH 6 y pH 7.....	47
Figura 12: actividad entre pH 7 y pH 8.	48
Figura 13: actividad entre pH 7, pH 8 y pH 9.....	49
Figura 14: actividad entre pH 9 y pH 10.	49
Figura 15: actividad entre pH 10 y pH 14.....	50
Figura 16: Diagrama de flujo, sistema Bardenpho de cuatro etapas.	51

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: ALTERACION FISICA DEL AGUA 6

Tabla 2: ALTERACION QUIMICA DEL AGUA 7

Tabla 3: ALTERACIONES BIOLÓGICAS DEL AGUA 8

Tabla 4: SUSTANCIAS CONTAMINANTES DEL AGUA 8

Tabla 5: Valores para definir una fuente contaminante. 12

Tabla 6: Concentraciones máximas permitidas para una descarga a cuerpos de
agua. 13

Tabla 7: Concentraciones limites para descargas a cuerpos de agua con un alto
poder de dilución. 15

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Nitrificacion y Desnitrificacion como aspecto general

Se le denomina agua residual a todo producto hídrico que ya ha sido utilizado en algún proceso municipal o industrial, como el agua que se utiliza para realizar una acción tan básica e importante como lavarse las manos o como agente regulador de temperatura en una torre de enfriamiento, intercambiador de calor, centrales nucleares, fuente de energía, etc. Como producto del uso y desecho, el agua residual tiende a formar compuestos nitrogenados como el amonio, amoniaco, nitratos y nitritos o adherir nitrógeno a residuos orgánico, esto gracias al ciclo del nitrógeno donde todo producto es amonificado, resultado de una fijación o reducido en algún compuesto nitrogenado como es el caso del Nitrógeno atmosférico quien por medio de fijación y descomposición química se transforma en nitrógeno amoniacal o amoniaco, estos compuestos serán utilizados por bacterias especializadas en la transformación de dichas moléculas para obtener moléculas más simples y así re circular el nitrógeno en estado gaseoso.

La problemática de la existencia de estos compuestos como producto de desecho, se presenta al momento de verter el agua en yacimientos (permitidos por el ministerio de salud bajo los estrictos reglamentos que regulan esta situación) donde las moléculas de los compuestos nitrogenados desencadenarían una reacción de oxidación en presencia de oxígeno, consumiendo todo el O₂ presente en el medio para dar como resultado la transformación de NH₄⁺/NH₃ a nitratos. La ausencia de O₂ generaría una zona de anoxia la cual como consecuencia tendría la eliminación y extinción de toda vida que este a su alrededor que en este caso sería la flora y fauna marina.

La Nitrificacion y la Desnitrificacion nacieron como solución a esta problemática, donde bacterias como son los **Nitrosomas** y las **Nitrobacters** presentes en lodos activos de nitrificación reaccionan en presencia de moléculas de amonio que se puedan encontrar en el medio que los rodea y así poder transformarlas en moléculas de nitratos mediante la oxidación a base de oxígeno, para la transformación a moléculas de Nitratos existen dos pasos, esto es debido a que las bacterias se complementan uno a la otra. Cuando los **Nitrosomas** oxidan las moléculas de **NH₄** a nitritos, los **Nitrobacters** se encargan de transformar los nitritos a nitratos.

Los **Nitrosomas**, reacciona con las moléculas de amonio transformándolas en nitritos y nitratos como se puede apreciar en la siguiente ecuación química (reacción a).



En la reacción química, las 55 moléculas de amonio presentes en los reactivos serán transformado por la acción de las bacterias nitrificantes utilizando las 76 moléculas de oxígeno que se encuentran en forma de O_2 , el bicarbonato que se halla del lado de los reactivos será utilizado. Como producto de esta oxidación obtendremos materia celular que será utilizada como energía más adelante, Nitrato que es el producto objetivo, agua y ácido carbónico que perjudicará el pH del medio.

En la siguiente ecuación (reacción b), mientras que las **NB** tienen un poco menos de especificidad frente a los compuestos nitrogenados, por lo tanto, suelen reaccionar en presencia de moléculas de amonio y moléculas de nitritos, aunque en una razón muy distanciada una de la otra (comparando reacción a con reacción b):



Las **NB**, están más enfocadas en la oxidación de los compuestos nitrogenados como los nitritos sin dejar fuera a las moléculas de amonio. En este caso, para la oxidación de los 400 moles de nitrito y solo 1 mol de amonio, se deben utilizar una cantidad menor de Oxígeno que vienen siendo 210 moles de Oxígeno.

Las **NS** y las **NB** no se ven representadas en la reacción debido a que esta sucede dentro de estos M.O, por lo cual no se ve graficada directamente en la ecuación química

Cuando el NH_4^+ es transformado en moléculas de nitrato mediante la oxidación con oxígeno, estas aguas pasan a una segunda fase que es la desnitrificación, donde aquí los nitratos y nitritos pasan a ser transformados nitrógeno gaseoso y eliminados por aireación del sistema, esta acción es realizada por un grupo de bacterias desnitrificantes que está conformado por las ***Pseudomonas*, *Micrococcus*, *Achromobacter* y *Bacillus***, existen dos vías de transformación donde reaccionan los nitratos y otra donde los nitritos son quienes se encuentran en medio de este proceso, aunque las dos llegan al mismo objetivo, hacer que los compuestos nitrogenados pasen a ser nitrógeno gaseoso:



Que sucede en este caso, como no existe oxígeno de manera directa (disuelto en el agua) o lo que hay no da para la reacción completa, las bacterias desnitrificantes consumen el oxígeno que se encuentra enlazado a la molécula de nitrato, por lo tanto, se separa del nitrógeno quedando como N_2 que se halla en estado gaseoso.

La **NT/DesNT** tendrán ventajas y desventajas dependiendo el tipo de sistema por el cual se empleen estos métodos ya que existen variados equipos para el uso de la eliminación de los compuestos nitrogenados, estas ventajas pueden tener relación con el ahorro de dinero ya que en varios sistemas existe recirculación de productos, optimización de tiempos ya que pueden realizar un mismo objetivo en comparación a los demás pero en una menor cantidad de tiempo, consecuencias

para distintas variables esto se refiere a que la implementación de estos métodos en sistemas totalmente optimizados para el cumplimiento de su función puede tener menor impacto en el pH, en la temperatura, presión, densidad, función de las bacterias, etc.

Las desventajas que pueden afectar o producir la NT/DesNT pueden ser a las distintas variables que ya se han mencionado en las ventajas pH, temperatura, presión. Cuando estas variables llegan a puntos críticos pueden ver afectado el funcionamiento de las bacterias teniendo así problemas como la flotación de los lodos, **bulking**, inactivación de las funciones de los M.O y pérdidas de dinero a nivel empresarial ya que el no funcionamiento de la planta de tratamiento llevaría a comprar y utilizar productos externos los cuales tienen un gran valor comercial. El agua residual, después de haber sido tratada, debe cumplir parámetros impuestos dados por el ministerio de salud y medio ambiente los cuales están decretados dentro de distintos decretos supremos como el D.S número 90 donde restringe y limita los parámetros para los distintos componentes del agua residual, estos valores varían dependiendo los compuestos o elementos como por ejemplo para el Nitrógeno, Fosforo, metales pesados, etc.

1.2 Objetivo general

Explicar, interpretar y comparar los procesos de Nitrificación y Desnitrificación para la eliminación de los compuestos nitrogenados llevados a cabo por distintos sistemas de tratamiento de aguas residuales y municipales.

1.2.1 Objetivos específicos

- Definir el concepto de agua residual y los distintos factores de la contaminación presentes en el agua. Conocer y detallar los aspectos del D.S número 90 que influyen, regulan e imponen los parámetros óptimos para el vertimiento de aguas residuales tratadas a cuerpos de agua o grupos fluviales.
- Explicar el ciclo del nitrógeno y como funciona en el agua residual, exponer sobre los distintos métodos de eliminación biológica del nitrógeno que se encuentran disponibles y se aplican en las plantas de tratamiento.
- Explicar el funcionamiento del sistema Bardenpho, condiciones de los perímetros y realizar conclusiones sobre este proceso.

CAPITULO 2: MARCO TEORICO

2.1 Aguas residuales.

2.1.1 Definición de aguas residuales y factores de la contaminación.

Las aguas residuales son todo producto hídrico utilizado de manera municipal (casas, departamentos, condominios, etc.) para acciones de limpieza, uso, aseo y son desechadas al alcantarillado, o de manera industrial (obtención de energía, estabilizador de temperatura, etc.) la cual después de haber cumplido su función son entregadas a plantas de tratamientos como un producto sin valor comercial y sin algún uso secundario, este tipo de aguas contienen compuestos orgánicos y químicos resultado de distintas reacciones que se producen a lo largo de su "vida" útil.

Debido a que el agua en estado de "residuo" presenta un gran problema para el medio ambiente, es necesario la aplicación de tratamientos para el agua residual mediante distintos equipos para obtener como producto un residuo que no tenga impacto en el medio ambiente, esto quiere decir, que verter el producto tratado en un río o lago no signifique un daño perjudicial para el medio en el cual se encuentre o para la fauna marina presente. Estos procesos de limpieza significan un gran desafío para las plantas de tratamientos ya que no se trata de la eliminación o transformación de un solo residuo en específico, si no, que de una multitud de varios tipos de residuos.

Los residuos que se pueden hallar dentro de estas aguas son: metales pesados, productos de tipo orgánicos como basura o materia fecal, urea y objetos en descomposición y compuestos químicos. Para clasificar la contaminación se han creado distintas categorías de contaminación en el agua, estas pueden ser de tipo físico, químico o biológico, la contaminación física puede apreciarse con tan solo observar u oler el agua que ya ha sido utilizada y para el tipo químico y biológico se puede determinar al realizar un análisis de laboratorio. La impureza del agua puede deberse a un conjunto de factores de contaminación todos trabajando a la vez o simplemente de uno solo, todo va a depender de la exposición a la cual se encuentre el agua, condiciones medio ambientales, materia orgánica contenida, tipos de residuos y la vida microbiológica que prolifere en esas condiciones.

La categorización de los tipos de contaminantes se reparte en cuatro grupos clasificando la forma y factores de contaminación del agua (Echarris. 2007), estas se detallan en las siguientes cuatro tablas:

Tabla 1: ALTERACION FISICA DEL AGUA

Perturbaciones físicas	Características del contaminante
Color	<i>El agua no contaminada tiene colores característicos que pueden ser rojizos, amarillo o verde en pequeñas cantidades y será gracias a la presencia de algas o vida marina, esto sucede de manera contraria al tener presencia de contaminantes donde los colores pueden cambiar y volverse negros, café oscuro o blancos. Generalmente no se puede establecer una relación entre el color y el tipo de contaminante, pero si ayudaría a identificar aguas contaminadas.</i>
Olor y sabor	<i>Los compuestos químicos presentes en el agua (cloro, fenoles, etc.) y la posible descomposición de materia orgánica marina como algas u hongos pueden emitir olores muy fuertes del agua hacia el exterior a pesar de estar en una pequeña concentración. La existencia de sales o minerales podrán hacer variar el sabor del agua considerablemente.</i>
Temperatura	<i>Acrecentar la temperatura de las aguas disminuye su solubilidad en los gases aumentando así la solubilidad generada en las sales, esto como consecuencia intensifica la velocidad metabólica de la materia orgánica presente en el agua, por lo que la descomposición se realiza con una rapidez mayor. Las industrias o empresas que utilizan el agua como fuente de energía o producto para realizar un determinado proceso contribuyen al cambio de temperatura ambiental.</i>
Material en suspensión	<i>Para este tipo de contaminación existen dos variables, está la contaminación por partículas de tipo coloidal o contaminación por materiales en suspensión. La contaminación coloidal solo podrá ser extraída y eliminada del agua mediante decantación, coagulación o floculación. En cambio, la contaminación de materiales en suspensión podrá ser extraída por arrastre físico con algún instrumento de agarre o simplemente será eliminada cuando el movimiento del agua lo permita.</i>
Espuma	<i>Los residuos de tipo detergente producen espuma y como resultado dan un efecto llamado eutrofización. Impiden y rebajan el poder depurador de las bacterias presentes. En las plantas de tratamiento de aguas la espuma interfiere en los procesos de floculación y sedimentación en las estaciones depuradoras.</i>
Conductividad	<i>El agua en estado puro suele tener una conductividad muy baja si se compara con el agua natural, el cual gracias a la presencia de iones en estado de disolución agrega mayor poder de conductividad. La conductividad resulta ser proporcional a la cantidad de electrolitos por eso la medida de este factor y sus resultados pueden significar la presencia de contaminación de objetos físicos del agua.</i>

Fuente: Echarri, 2007

Tabla 2: ALTERACION QUIMICA DEL AGUA

Perturbación Química	Características del contaminante
pH	<i>El pH ácido en el agua residual puede significar que existe presencia de compuestos nitrogenados, ácido sulfúrico que puede provenir de minerales cercanos u otro tipo de compuesto químico producto de la explotación industrial cercana.</i>
Cantidad de Oxígeno disuelto	<i>La cantidad de oxígeno que se encuentra disuelto en las aguas es importante para mantener la vida, por lo tanto, si el O₂ que se halla está en niveles bajos significa mala calidad del agua producto de reacciones llevadas a cabo por Microorganismos.</i>
DBO: Demanda Bioquímica de Oxígeno	<i>El DBO, es el oxígeno disuelto necesario por los M.O para oxidar la materia orgánica biodegradable presente en el agua residual, la respuesta de este análisis se lee después de 5 días de haber realizado el análisis y esto se debe al tiempo en que demora el río Támesis en llegar al mar. Sus resultados dan valor a la calidad del agua y permite saber cuánto O₂ es necesario para la depuración del agua.</i>
DQO: Demanda Química de Oxígeno	<i>El DQO, es la cantidad de oxígeno necesario para oxidar todo tipo de material que se encuentre envuelto en el agua, esto se realiza en presencia de un oxidante químico. El DBO y el DQO tienen cierta relación en la medición del Oxígeno, solo que el DQO presenta una ventaja de tiempo ya que entrega resultados en dos horas, pero no tiende a diferenciar entre la materia biodegradable además de no entregar información sobre la velocidad de degradación.</i>
Nitrógeno Total	<i>La presencia de Nitrógeno en distintas formas es producto de la eutrofización en las aguas, el nitrógeno consume el oxígeno por lo que resulta un gran problema.</i>
Fosforo total	<i>La presencia de este elemento en el agua es la culpable del efecto de eutrofización. El fosforo total incluye todos los compuestos donde se encuentre presente polifosfatos, fosforo orgánico, etc.</i>
Aniones y Cationes	<i>La presencia de aniones y cationes significa las alteraciones de aspectos químicos como el aumento de la salinidad, aumento de la dureza del agua, bioacumulación de metales pesados, etc. Los cationes presentes pueden ser: sodio, calcio, magnesio, amonio y metales pesados. Mientras que en la otra parte, los aniones pueden ser: cloruros, nitritos, compuestos fosforados, cianuros y sulfuros.</i>
Compuestos orgánicos	<i>Los residuos resultantes de procesos de tipo alimenticio o industriales difíciles de poder metabolizar y que son vertidos en ríos o lagos terminan flotando sobre la superficie del agua provocando daños en la fauna marina, los residuos como clorofenoles producen mal olor y sabor en el agua.</i>

Fuente: Echarri, 2007

Tabla 3: ALTERACIONES BIOLÓGICAS DEL AGUA

<i>Perturbación Biológica</i>	<i>Características del contaminante</i>
<i>Bacterias Coliformes</i>	<i>Las bacterias coliformes son producto de la presencia de residuos de tipo orgánicos o desechos del metabolismo humano como feca u orina, como son desechos humanos contienen gran carga bacteriana donde puede estar presente una enfermedad típica como Hepatitis B. Estos residuos tienen olor y rasgos físicos muy característicos, suelen flotar debido a que son elementos de poco peso.</i>
<i>Virus</i>	<i>Al igual que las bacterias coliformes, los virus son productos de los desechos humanos y los restos orgánicos de algún alimento, animal o planta.</i>

Fuente: Echarri, 2007

Tabla 4: SUSTANCIAS CONTAMINANTES DEL AGUA

<i>Sust. contaminantes</i>	<i>Características del contaminante</i>
<i>Microorganismos patógenos</i>	<i>Los M.O patógenos que se pueden encontrar en el agua residual están compuestos por distintos grupos como las bacterias, virus, protozoos, priones, etc. Estos M.O pueden provocar enfermedades de riesgo para todos los seres vivos (tifus, hepatitis A, B, cólera y variados tipos de gastroenteritis. Para poder consumir el agua la cantidad de M.O. patógenos debe ser 0 cada 100 ml.</i>
<i>Sustancias químicas inorgánicas</i>	<i>Suelen ser ácidos, sales y metales de tipo tóxicos que en pequeñas o grandes cantidades al tener contacto con algún ser vivo pueden causar graves enfermedades, intoxicación hasta la muerte. Suelen tener consecuencias en los equipos de trabajo cercanos y la producción agrícola.</i>
<i>Compuestos orgánicos</i>	<i>Los compuestos orgánicos abarcan una gran cantidad de residuos, como el petróleo, los plásticos, detergentes, plaguicidas que terminan desembocando en el agua y permanecen por un largo tiempo debido a la complejidad de sus estructuras químicas.</i>
<i>Material suspendido y sedimentado</i>	<i>Pertenecen a la fuente más grande de contaminación en el agua provocando turbidez debido a la acumulación del material evitando y dificultando el crecimiento de los organismos. Su aglomeración ocasiona daños en sectores de alimentación.</i>
<i>Contaminación térmica</i>	<i>El agua proveniente de una industria la cual fue usada como estabilizador de temperatura o, ya sea, cualquier otro fin es vertida al mar con una temperatura alta, causando así una diferencia térmica que reduce la cantidad de O₂ del medio.</i>

Fuente: Echarri, 2007

Como se puede apreciar en los cuadros vistos anteriormente, existe una variabilidad de efectos provocados por la contaminación en el agua que no solo engloba al medio ambiente, si no, que a los seres vivos. Cabe destacar y resaltar que los aspectos nombrados en los cuadros 1 hasta el 4 sobre contaminación serán vistos por partes mediante el tema se vaya desarrollando.

En este caso, el contaminante más importante para nosotros resulta ser el "Nitrógeno" o la presencia de compuestos nitrogenados que es parte de los tipos de alteraciones químicas del agua. Para regular el vertido de desechos industriales ya tratados existen distintos decretos medioambientales que limitan cada uno de los compuestos contenidos dentro de estos desechos como el fosforo, nitrógeno, metales pesados, etc. Más adelante ahondaremos en el decreto supremo N° 40 y que abarca los límites de descarga de aguas residuales tratadas en fuentes o cuerpos de aguas.

2.1.2 Normativa chilena: D.S 90 Ministerio del medio ambiente.

Para que existe un cuidado excepcional y reglas las cuales hacen alusión al respeto por el medio ambiente que nos rodea, se conformó una organización que solo estuviese encargada de sector que en este caso es el Ministerio del medio ambiente, este organismo gubernamental es el encargado de la protección, conservación de la variación biología que pueda existir en la naturaleza (tomando en cuenta los suelos, el mar y el aire), el cuidado de los recursos naturales de tipo renovables, el cuidado de las fuentes hídricas evitando así su agotamiento a corto plazo, regulación de las normas y todo los demás ámbitos en los cuales pueda estar vinculado el medio ambiente. (*Fuente: Ministerio del medio ambiente, 2016*)

Como objetivo principal el ministerio del medio ambiente debe desarrollar todo lo necesario en cuanto relacionado al medio ambiente, a que vamos con esto, este ente debe formar distintos reglamentos que aseguren la compatibilidad entre la vida humana, las industrias contaminantes, la flora y fauna, asegurar la gestión ambiental, el cumplimiento de normas, etc. Para esto se han formado leyes y decretos que aseguran toda forma de vida y ponen límites a las emisiones, la principal norma es la ley N°19.300 que se encarga de establecer los límites de emisión de material particulado y las normas mínimas que se deben respetar tener una óptima calidad de vida. Por un lado, tenemos las normas de calidad de vida que como objetivo principal busca la protección de la vida y salud humana, además, el cuidado del medio ambiente junto con la preservación de esta misma, las normas que se relacionen con la emanación de gases particulados deben regular la cantidad de contaminantes contenidos en el aire y limitar las fuentes emisoras.

Las normas de calidad entablan las cantidades de concentraciones mínimas o máximas admisibles de los elementos, compuestos, procedentes químicos o

biológicas, desechos radioactivos, ruidos o cualquier factor que puedan dañar la salud o afectar la preservación del medio ambiente. Mientras que las normas de emisión ponen límite a las cantidades de contaminantes que puedan emitir al aire, aguas o tierra las instalaciones industriales o cualquier fuente emisora que pueda provocar contaminación.

El decreto supremo número 90, como ya se ha mencionado anteriormente, limita las cantidades y concentraciones de contaminantes vertidos hacia las aguas del territorio chileno pertenecientes al gobierno de Chile, por lo tanto, se han predispuesto distintas definiciones establecidas por el decreto comenzando por las unidades de medida para los distintos contaminantes que afectan las aguas.

Para las mediciones de contaminación se define **carga de contaminación diaria** como el cociente producto entre la masa o el volumen de un contaminante y el número de días en que se descarga el residuo líquido a un cuerpo hídrico. La **carga de contaminación diaria** se puede expresar en unidades de masa por unidades de tiempo, como por ejemplo para los sólidos suspendidos, aceites y grasas, hidrocarburos totales, volátiles y fijos, para los análisis de DBO₅, para metales pesados como el arsénico, aluminio, cianuro, mercurios, compuestos nitrogenados, etc. Volumen por unidad de tiempo para sólidos sedimentables y coliformes por unidad de tiempo para coliformes fecales o termotolerantes. La masa y volumen de un desecho contaminante equivale a las sumas de las masas y los volúmenes que han sido descargados día a día durante un mes determinado, estas se determinan como producto del volumen o la masa de las descargas multiplicado por la concentración.

Otro concepto que se halla dentro del decreto supremo 90 es el **Contenido de captación** y es la concentración media del agente contaminante presente cuando el agua percibe la fuente emisora, solo si, dicha captación se realice dentro del mismo sector de agua donde se produce la descarga. Cuando ya se ha vertido el producto contaminante dentro de una matriz de agua, la empresa encargada de la descarga debe dar aviso con detalles específicos a la dirección general de aguas o a la dirección general del territorio marítimo y de marina mercante, este ente deberá extraer muestras, verificar el volumen de muestra y las metodologías de análisis respetando los límites que se encuentran establecidos por la presente norma.

El **Contenido natural** es una definición que se encuentra, al igual que las anteriores, dentro del decreto supremo número 90, el **contenido natural** es la concentración de un contaminante en el lugar o cuerpo encargado de contener el agente, para que sea determinado como **contenido natural** debe estar en una situación donde no se encuentre alteración por el medio que lo rodea, o sea, que no se encuentre con intervenciones de tipo antrópicas que puedan causar una situación permanente, irreversible o inmodificable. El ente que está a cargo de establecer el contenido natural de un contaminante, dependiendo de los casos, será la dirección general de aguas o la dirección general del territorio marítimo y de marina

mercante. Hay que tener muy en cuenta que todos estos vertimientos de desechos se realizan en aguas de lagos, ríos y mares a excepción de sectores que almacenan agua, pero han sido formados artificialmente o se han predispuesto para la acumulación o tratamiento de aguas lluvias, estos receptores de desechos líquido han recibido el nombre, según el D.S 90, de **cuerpos de agua receptor o cuerpo receptor**. Como los anteriormente nombrados, el D.S en curso tiene muchos más conceptos a los cuales les entrega definición comenzando por lo más básico como lo es definir que es **descarga de residuos líquidos** y lo entrega como la evacuación o vertimiento de un producto contaminante hacia un agua receptor, este producto es el resultado de un proceso, actividad o un servicio de tipo industrial o ganadero, de igual manera, define los tipos de fuentes, como por ejemplo lo que es una **fuelle emisor**, es un establecimiento que vierte de uno a mas desechos contaminantes a las agua receptoras, estos desechos son resultados de procesos, actividades o servicios. Las **fuentes nuevas** son aquellas empresas o industrias que, hasta el día en vigencia, no se han registrado depositando desechos contaminantes a las aguas receptoras y las **fuentes existentes** son todas aquellas que anteriormente han formado desechos líquidos y los han depositado en las zonas de aguas receptoras.

Para saber cuál es el límite de aceptación de las aguas receptoras se ha creado un cálculo llamado **tasa de dilución del efluente vertido (d)** y es la división entre el **caudal disponible del cuerpo o agua receptor** y el **caudal medio mensual del efluente** vertido durante un mes donde la producción de residuos líquidos alcanza su punto más alto, si planteamos la formula como se indica en el D.S 90 queda de la siguiente manera:

$$d = \frac{\text{Caudal disponible del cuerpo receptor}}{\text{Caudal medio mensual de efluente vertido}}$$

El caudal disponible del cuerpo o agua receptor es la cantidad de agua disponible expresada en volumen por unidad de tiempo para establecer el poder o capacidad de dilución del agua receptor, el volumen y cantidad de caudal lo establece la dirección general de aguas.

El decreto en si es válido y se aplica para todo el territorio chileno desde las regiones más grandes hasta las islas más pequeñas y recónditas que se encuentren en las costas chilenas, pero, el D.S 90 crea zonas específicas que se encuentran delimitada por el decreto, para las descargas de desechos de tipo líquido. Estas zonas se llaman **zona de protección litoral** y se define como franja de playa, agua y fondo del mar adyacente a la costa continental o insular delimitada por una línea superficial imaginaria determinada por la dirección general del territorio marítimo y de marina mercante, esta zona es seleccionada mediante la siguiente fórmula:

$$A = \left[\frac{1,28 * Hb}{m} \right] * 1,6$$

Donde:

Hb: es la altura media del rompiente medida en metros

m: equivale a la pendiente del fondo del mar

A: seria la **zona de protección litoral** que será el resultado de la aplicación de la formula.

Para saber a qué corresponde Hb se realiza un cálculo, a manos de la dirección general del territorio marítimo y marina mercante, mediante un método en específico, en este caso, como se habla de manera general del decreto no vamos a introducimos a fondo en este análisis.

Para establecer que es una fuente emisora, se han dictaminado distintas concentraciones de contaminantes admisibles para descargar en aguas receptoras, cuando una desecho supera las concentraciones de x compuesto pasa a ser lo que llamamos “fuente emisora”, en el siguiente recuadro tendremos los valores aceptables para los contaminantes y una equivalencia límite de descarga diaria por x cantidad de habitantes:

Tabla 5: Valores para definir una fuente contaminante.

Contaminante	Valor característico aceptable	Carga contaminante diaria (equivalente a 100 habitantes/día)*
Aceites y grasas	60 mg/L	960 g/d
Aluminio	1 mg/L	16 g/d
Arsénico	0,05 mg/L	0,8 g/d
Boro	0,75mg/L	12,8 g/d
Cianuro	0.20 mg/L	3,2 g/d
Cloruros	400 mg/L	6400 g/d
Cobre	1 mg/L	16 g/d
Coliformes fecales o termotolerantes	100 NMP / 100 mL	1,6x10 ¹² coli/d
DBO5	250 mg O2/ L	4000 g/d
Elementos con capacidad de formar espuma (poder espumógeno)	5 mm	5 mm
Estaño	0,5 mg/L	8 g/d
Fenoles	0,05 mg/L	
Fluoruro	1,5 mg/L	24 g/d
Fosforo total	10 mg/L	160 g/d

<i>H.fijos, totales y volátiles</i>	<i>10 mg/L – 11 mg/L – 1 mg/L</i>	<i>160 g/d – 176 g/d – 16 g/d</i>
<i>Hierro</i>	<i>1,0 mg/L</i>	<i>16 g/d</i>
<i>Manganeso</i>	<i>0,3 mg/L</i>	<i>4,8 g/d</i>
<i>Mercurio</i>	<i>0,001 mg/L</i>	<i>0,02 g/d</i>
<i>Nitritos y nitratos</i>	<i>15 mg/L</i>	<i>240 g/d</i>
<i>Nitrógeno total</i>	<i>50 mg/L</i>	<i>800 g/d</i>
<i>pH</i>	<i>6 – 8**</i>	<i>- - -</i>
<i>Plomo</i>	<i>0,2 mg/L</i>	<i>3,2 g/d</i>
<i>Selenio</i>	<i>0,01 mg/L</i>	<i>0,16 g/d</i>
<i>Solidos sedimentables</i>	<i>6 mL/L en 1 hora</i>	<i>- - -</i>
<i>SST</i>	<i>220 mg/L</i>	<i>3520 g/d</i>
<i>Sulfato</i>	<i>300 mg/L</i>	<i>4800 g/d</i>
<i>Sulfuro</i>	<i>3 mg/L</i>	<i>48 g/d</i>
<i>Temperatura</i>	<i>20°C**</i>	<i>- - -</i>

Fuente: Biblioteca del congreso nacional de Chile, 2001

** Para definir estas cantidades se tomó como relación una cantidad de 200 Litros por habitante por día (L/hab/día)*

*** Estos valores no varían con la cantidad y concentración de los residuos, son valores estándar para cada uno de los contaminantes del recuadro.*

Las industrias o empresas que depositan residuos y se encuentran bajo los límites del cuadro anterior, no son denominadas como fuentes emisoras de residuos, por lo tanto, se rigen por un decreto distinto que se encuentra relacionado con el D.S 90. Cada uno de los productos contaminantes que se han mencionado con anterioridad significan un alto riesgo para la vida humana y la preservación de la flora y fauna marina, por lo tanto, es necesario que las industrias cumplan con los parámetros, para que esto no se llegara a transformar en un problema de contaminación en el cual el vertido se halle a diestra y siniestra, el D.S 90 pone límites permisibles para las descargas de contaminantes, esto significa que las concentraciones expresadas en el siguiente recuadro equivalen a los limite admisible por descarga:

Tabla 6: Concentraciones máximas permitidas para una descarga a cuerpos de agua.

<i>Contaminantes</i>	<i>Límite máximo permitido</i>
<i>Aceites y grasas</i>	<i>80 mg/L</i>
<i>Aluminio</i>	<i>6 mg/L</i>
<i>Arsénico</i>	<i>0,55 mg/L</i>
<i>Boro</i>	<i>1,5 mg/L</i>
<i>Cianuro</i>	<i>0,4 mg/L</i>
<i>Cloruros</i>	<i>400 mg/L</i>
<i>Cobre</i>	<i>- - -</i>

<i>Coliformes fecales o termotolerantes</i>	<i>1000/100 mL</i>
<i>DBO5</i>	<i>285 mg O2/L</i>
<i>Elementos con capacidad de formar espuma (poder espumógeno)</i>	<i>7 mm</i>
<i>Estaño</i>	<i>- - -</i>
<i>Fenoles</i>	<i>- - -</i>
<i>Fluoruro</i>	<i>1,5 mg/L</i>
<i>Fosforo total</i>	<i>10 mg/L</i>
<i>Hidrocarburos fijos</i>	<i>20 mg/L</i>
<i>Hierro</i>	<i>5,0 mg/L</i>
<i>Manganeso</i>	<i>0,3 mg/L</i>
<i>Mercurio</i>	<i>0,001 mg/L</i>
<i>Nitritos y nitratos</i>	<i>- - -</i>
<i>Nitrógeno total</i>	<i>50 mg/L</i>
<i>pH</i>	<i>6,00 – 8,5</i>
<i>Plomo</i>	<i>0,25 mg/L</i>
<i>Selenio</i>	<i>0,01 mg/L</i>
<i>Solidos sedimentables</i>	<i>- - -</i>
<i>SST</i>	<i>300 mg/L</i>
<i>Sulfato</i>	<i>1000 mg/L</i>
<i>Sulfuro</i>	<i>4 mg/L</i>
<i>Temperatura</i>	<i>35°C</i>

Fuente: Biblioteca del congreso nacional de Chile, 2001

Los límites aceptables son cantidades estandarizadas que pueden ampliar dependiendo la necesidad de la descarga, pero, cuando el agua receptora posee una mayor capacidad de dilución, el máximo de concentraciones aceptables puede variar aumentando el rango limite que se encuentra escrito en la tabla 2-a, para esto existe una fórmula que calcula el límite máximo permitido para el contaminante:

$$Ci = T1i * (1 + d)$$

Donde:

C_i: es el límite máximo permitido para el contaminante i

T1i: Límite máximo establecido por el D.S 90

d: Tasa de dilución del efluente vertido

Para los casos en que el poder de dilución del agua receptora sea mucho mayor y pueda recibir una cantidad más allá del límite establecido (tabla 2-a), se ha generado un conjunto de datos ordenados, donde se especifican los nuevos límites que puede aceptar el agua. Para eso se calcula Ci y con el resultado obtenido se toma una decisión, para esto existen dos posibilidades donde:

- a) Si la concentración de dicho contaminante es mayor al límite establecido en la tabla 2-a, pero, el poder de dilución del agua resiste la carga total, pues se toma como máximo lo establecido en 3-a.
- b) Si la concentración excede lo establecido en la tabla 3, el límite será lo indicado en esta misma tabla, por lo tanto, la carga contaminante deberá estar bajo el nuevo límite permitido.

Tabla 7: Concentraciones límites para descargas a cuerpos de agua con un alto poder de dilución.

Contaminantes	Límite máximo permitido
Aceites y grasas	110 mg/L
Aluminio	11 mg/L
Arsénico	1 mg/L
Boro	- - -
Cianuro	1 mg/L
Cloruros	2000 mg/L
Cobre	3 mg/L
Coliformes fecales o termotolerantes	1000/100 mL
DBO5	300 mg O2/L
Poder espumógeno	7 mm
Estaño	- - -
Fenoles	- - -
Fluoruro	1,5 mg/L
Fosforo total	15 mg/L
Hidrocarburos fijos	50 mg/L
Hierro	10 mg/L
Manganeso	3 mg/L
Mercurio	0,01 mg/L
Nitritos y nitratos	- - -
Nitrógeno total	75 mg/L
pH	6,00 – 8,5
Plomo	0,5 mg/L
Selenio	0,1 mg/L
SST	300 mg/L
Sulfato	2000 mg/L
Sulfuro	10 mg/L
Temperatura	40°C

Fuente: Biblioteca del congreso nacional de Chile, 2001

Cada uno de los límites, para los factores ya mencionados, están acondicionado en un ambiente estándar, con esto nos referimos a que se está suponiendo que el agua que recibirá los residuos tiene un poder de dilución normal

o bajo, pero también existen límites para las aguas con un gran poder de dilución como se explica en el cuadro 3-a. Otras de las excepciones para el vertido de residuos es para las **zonas de protección litoral** quien, en este caso, los límites de algunos residuos son mucho más bajos que los límites estándar para cualquier zona que se encuentre fuera de protección.

Tabla 8: Concentraciones permitidas a descargar dentro de zonas de protección litoral

Contaminantes	Límite máximo permitido
Aceites y grasas	20 mg/L
Aluminio	1 mg/L
Arsénico	0,2 mg/L
Boro	No permitido
Cianuro	0,5 mg/L
Cloruros	No permitido
Cobre	1 mg/L
Fecal. Termo.	1000 - 70 mL*
DBO5	60 mg O2/L
Elementos con capacidad de formar espuma (poder espumógeno)	No permitido
Estaño	0,5 mg/L
Fenoles	No permitido
Fluoruro	1,5 mg/L
Fosforo total	5 mg/L
Hidrocarburos fijos	No permitido
Hierro	10 mg/L
Manganeso	2 mg/L
Mercurio	0,005 mg/L
Nitritos y nitratos	No permitido
Nitrógeno total	50 mg/L
pH	6,00 – 9,00
Plomo	0,2 mg/L
Selenio	0,01 mg/L
SST	100 mg/L
Sulfato	No permitido
Sulfuro	1 mg/L
Temperatura	30°C

Fuente: Biblioteca del congreso nacional de Chile, 2001

Como se puede apreciar, en algunos productos las concentraciones admisibles disminuyeron considerablemente, en otras se mantuvieron o no se permite la descarga, como por ejemplo, los nitritos y nitratos no son admisibles

para estas zonas, los sulfatos, elementos con poder espumogenicos, etc. por lo cual, existe una especificidad al momento de verter los residuos en estas zonas que podríamos denominar “especiales”. Esto se debe a que las zonas protegidas suelen estar en contacto directo con la vida humana o perjudica en gran mayoría la flora y fauna marina. La idea de imponer límites a la descarga de residuos es para controlar el impacto en el medio ambiente y a su vez poder eliminar desechos sin abusar o sobreexplotar esta posibilidad.

El objetivo del D.S 90 es controlar lo máximo posible todo lo que conlleve productos de desechos y su descarga, claramente este no es el único decreto o norma enfocada en este proceso, pero como ya hemos mencionado anteriormente, este es el D.S más importante en este caso.

2.2 Contaminación por compuestos nitrogenados

2.2.1 Presencia de nitrógeno contaminante en el medio ambiente

El Nitrógeno, elemento químico N° 7 de la tabla periódica, perteneciente al grupo de los “no metales”, se puede hallar en estado gaseoso de manera natural y también en estado liquido aunque este último estado no es habitual en la naturaleza.

Este elemento se emplea de distintas formas en la industria, como por ejemplo:

- Fabricación del acero inoxidable.
- Conservación de alimentos.
- Componente de gran parte de las drogas farmacológicas.
- Producción de piezas eléctricas.

El uso de nitrógeno en la industria ha significado un gran apoyo debido al bajo coste y los beneficios que ocasionalmente puede tener y entregar, aun así, todo producto que es usado de manera industrial produce cierta cantidad de desechos los cuales, dependiendo la materia utilizada, puede ser un desecho no peligroso o altamente peligroso.

En el caso del nitrógeno, los desechos que provienen del uso de este elemento contienen compuestos nitrogenados, como puede ser la presencia de amonio, grupos amino, amoniaco, nitrato, etc. Estos residuos en la mayor parte de los casos llegan a parar a grupos fluviales o agua como ríos, lagos y mar. La presencia de estos compuestos en el agua en forma de residuos presenta un peligro para la flora y fauna debido a que son los principales causantes de la eutrofización que significa la proliferación de algas en lugares con gran cantidad de compuestos contaminantes que tengan dentro de sus organismos cantidades que superen lo

aceptable de fósforo y nitrógeno, además de emitir gases de invernadero y deposiciones de tipo ácido. Esta contaminación provoca la descomposición de la materia orgánica presente en el agua, por lo tanto, ocasiona que se desaten reacciones químicas que consumen, como fuente de principal de energía, el oxígeno que se halla disuelto en el medio. Como ya sabemos desde la antología misma, el oxígeno es la fuente para vivir de todo organismo conocido y por conocer, por lo menos dentro del planeta tierra. Al no haber oxígeno en el agua la vida muere por la falta de esta misma, agregando, que las algas que proliferan como consecuencia de la eutrofización bloquean la energía del sol que pueda ingresar bajo la superficie del agua, por lo tanto, termina por destruir toda presencia de vida y eliminando las posibilidades de consumo de este cuerpo fluvial.

Este paisaje desolador es gracias al mal manejo de los residuos nitrogenados o las aguas contaminadas con compuestos de nitrógeno, su tratamiento y vertido, que mayoritariamente, proviene de las actividades antropogénicas donde el uso indiscriminado de fertilizantes provoca una lixiviación hacia las aguas subterráneas que luego de recorrer lo necesario tienen contacto con las aguas superficiales. El problema no solo es para la materia viva que está en contacto directo con estas aguas contaminadas, si no, que para los humanos que dependen del consumo de agua de estos lugares igual. La exposición prolongada o el consumo de organismos contaminados con nitrógeno como el nitrato puede tener consecuencias graves para la salud y en el caso de las embarazadas puede desencadenar una enfermedad llamada "*Metahemoglobinemia*" o síndrome del bebé azul, los nitratos o productos nitrogenados son potentes fuentes de desarrollo cancerígeno por lo cual el consumo indebido de productos que se hallen con contaminación de nitrógenos o la exposición al nitrato en sí puede provocar cáncer, aumentar la muerte fetal y desencadenar problemas de peso del bebé al momento de nacer.

Retomando el tema principal que es la contaminación por nitrógeno de las aguas o cuerpos fluviales. El nitrógeno, como el azufre y el carbono pertenecen a ciclos donde son transformados en distintos compuestos por variados métodos

2.2.2 Ciclo del nitrógeno

El nitrógeno es parte de los cinco ciclos biogeoquímicos más importantes que permiten la proliferación y sostenimiento de ciertos aspectos de la naturaleza, este ciclo posibilita la transformación, oxidación y reducción de los variados compuestos nitrogenados. El ciclo se encuentra formado por, los ya mencionados compuestos nitrogenados, y por rutas que se ubican paralelamente una a la otra con el objetivo de asimilar el nitrógeno que se halla en los distintos lugares como puede ser el suelo y el mar, para así, dejar a disposición de los seres vivos los nutrientes.

Proceso del ciclo del nitrógeno

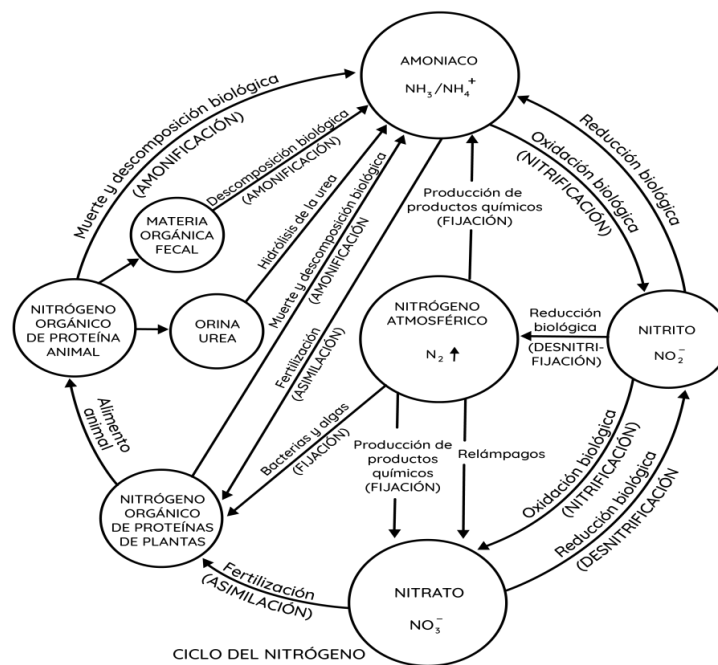


Figura 1: Ciclo del nitrógeno. Fuente: Practical Wastewater Treatment, 2006

El ciclo del nitrógeno está constituido por varios procesos los cuales deben concretarse para que los seres vivos puedan aprovechar el elemento en sí y utilizarlo para realizar distintas actividades.

Por esta razón, el ciclo del nitrógeno se realiza detalladamente paso a paso donde se pueden hallar reacciones químicas, biológicas y físicas.

El primer paso del ciclo del nitrógeno es la **fijación biológica**. Los seres vivos como tal no pueden consumir o absorber el nitrógeno en su estado gaseoso que es la manera en la cual se encuentra en el medio ambiente, por lo tanto, el N_2 debe ser transformado en *nitrógeno orgánico*, cuando el *nitrógeno gaseoso* cae al suelo es absorbido por las *bacterias simbióticas* que se hallan esparcidas, generalmente, en los cuerpos de las plantas. Una vez asimilado el *nitrógeno gaseoso* por las plantas, esta pasa a integrar parte de la cadena alimenticia, entonces cuando un herbívoro coma e ingiera esta planta rica en nitrógeno ya asimilado se pasara a dar el siguiente paso del ciclo del nitrógeno: **amonificación**.

El segundo paso del ciclo del nitrógeno es la **amonificación**. Esta parte tiene como objetivo principal la transformación por método químico del nitrógeno que fue asimilado por la planta que termino siendo consumida por el animal herbívoro, por lógica de la cadena alimenticia, los animales herbívoros son consumidos por animales carnívoros. Cuando un animal carnívoro muere, sea cual sea la razón, comienza su proceso de descomposición liberando **nitrógeno amoniacal** en forma de gas. Ya sucedido esto, continuamos con el tercer paso del ciclo del nitrógeno: **nitrificación y desnitrificación**.

El último paso del ciclo del nitrógeno es la **nitrificación** y **desnitrificación**. Cuando el **nitrógeno amoniacal** ($N - NH_4$) que se halla en estado gaseoso vuelve a caer al suelo es fijado y utilizado por las bacterias nitrificantes para aprovechar sus beneficios, al ser usado el $N - NH_4$ es transformado en **nitratos** (NO_3) y **nitritos** (NO_2). Cuando ocurren las transformaciones y quedan solo los productos NO_3 y NO_2 , estos son utilizados por los microorganismos desnitrificantes que se encuentran en las plantas ocupando el oxígeno de estos compuestos, separando el O del N, liberando solo el nitrógeno que ahora se encontrara en forma gaseosa el cual es emanado al exterior por estas bacterias, por lo tanto, este ciclo se vuelve a repetir aunque en otro sitio, involucrando a otra planta y otros animales.

2.3 Eliminación del nitrógeno del agua residual.

2.3.1 Nitrificación y desnitrificación por organismos biológicos

Eliminar el nitrógeno de las aguas residuales de origen municipal o industrial impone un gran riesgo y trabajo para quienes están a cargo de supervisar este proceso, esto es debido a que la nitrificación y la desnitrificación son un conjunto de reacciones que se encuentran unidas (de manera no directa) pero si interactúan conjuntamente, que se quiere decir con esto, que la nitrificación es el trabajo o proceso anterior a la desnitrificación. Antecedentemente se ha mencionado que los microorganismos encargados de la eliminación del nitrógeno son de tipo autótrofos, por lo tanto, cualquier tipo de alteración en el ambiente en que se hallen ya sea una subida o bajada de la alcalinidad del agua, variaciones en la temperatura o que no exista el alimento necesario para la oxidación puede afectar el proceso completo teniendo como consecuencia una mala eliminación del nitrógeno

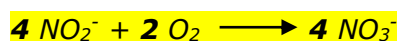
Partiendo por la nitrificación, es la etapa del ciclo biogeoquímico del nitrógeno donde ocurre la oxidación del amonio a nitrito y nitrito a nitrato. Este periodo consta de dos sucesos, la oxidación del **nitrógeno amoniacal** a nitrito y la oxidación de esta última a nitrato (*ejemplificado en la reacción a y b*) todo esto sucede gracias a la acción de las bacterias oxidantes de amonio (**AOB**) y nitrito (**NOB**) (Sánchez, Jaime, and Janeth Sanabria. "Metabolismos microbianos involucrados en procesos avanzados para la remoción de Nitrógeno, una revisión prospectiva." *Revista Colombiana de Biotecnología* 11.1 (2009))

Reacción a, transformación de amonio a nitrito



El oxígeno es consumido por los **Nitrosomas**, pertenecientes a las **AOB** para oxidar las moléculas de amonio en nitrito, generar agua que será aprovechada por el sistema de circulación de la planta de tratamiento de agua y energía, suministro principal para las bacterias.

Reacción b, transformación de nitrito a nitrato



El O_2 es el elemento principal en estas reacciones para que se logre el objetivo prometido, la transformación a NO_3^- . En esta acción los **Nitrobacters** son los encargados que realizar el proceso.

Cuando esto ya ha sucedido, los compuestos nitrogenados transformados siguen el flujo de agua para pasar a la siguiente fase, la desnitrificación. Las bacterias desnitrificantes de tipo heterótrofas, como las **Pseudomonas, paraccocus y Bacillus**, reducen (anteriormente, en la nitrificación las **AOB** oxidaban) el NO_3^- que se logro oxidar y el NO_2^- que no logro ser oxidado.

Para que la reducción de los nitritos/nitratos suceda, las bacterias deben estar bajo ciertas condiciones como:

- a) La alcalinidad del agua debe ser lo más básica posible, sin llegar a los extremos (pH 8 – 10)
- b) La zona o el tanque donde se hallen las bacterias tiene que estar anaeróbico, para que así el oxígeno de los nitratos/nitritos sea arrancado.

La reacción de las bacterias desnitrificantes en presencia de los compuestos nitrogenados es la siguiente (**reacción c**):

Reacción c, reducción de los nitritos y nitratos a nitrógeno gaseoso



Los microorganismos responsables de esta reacción consumen el oxígeno que se encuentra adherido a los nitratos y nitritos debido a que también necesitan de moléculas de oxígeno para poder funcionar, por lo tanto, se encargan de procesar los compuestos nitrogenados que son enviados desde la nitrificación para así poder consumir su oxígeno, cuando esto sucede el nitrógeno se transforma en un elemento más nocivo y mucho menos peligroso para la vida humana, el N_2 (nitrógeno gaseoso) el cual es eliminado del agua al momento de airear el agua residual en las plantas de tratamiento.

La implementación de métodos para la eliminación del nitrógeno ya sea de cualquier medio, en este caso es el agua residual, es una gran solución para evitar la proliferación o el desarrollo de la eutrofización, además, este es un indicador para poder ver y definir la calidad del agua. En algunas ciudades del mundo son dependientes de procesos biológicos como la desnitrificación por el uso de insecticidas u otro tipo de fertilizantes, estos llegan al suelo y lixivian a las aguas subterráneas contaminándola y volviéndola imposible para el consumo, por lo tanto, afectan de manera directa a la población que sin estos métodos de eliminación del nitrógeno vivirían con el suplicio permanente de no tener medios para consumir agua tanto para el organismo o para emplearla en sus cultivos ya que el exceso de

compuestos nitrogenados terminaría por matar o exterminar de raíz los cultivos y en el cuerpo humano tendría consecuencias negativas para la salud desarrollando enfermedades. El insertar o integrar la nitrificación y la desnitrificación en las aguas residuales permite controlar problemas como la cantidad de productos químicos y controlar el pH, cabe destacar, que en la nitrificación se presenta un pH mas acido que en la desnitrificación debido a que la oxidación del amonio influye de manera acida en la alcalinidad del agua, en pocas palabras, la oxidación del amonio conlleva la destrucción de la alcalinidad.

Para que la nitrificación y la desnitrificación sean procesos satisfactorios, beneficiosos y cumplan con su objetivo, se han integrado pasos al ciclo de la desnitrificación, la **pre – desnitrificación** y la **post – desnitrificación**.

La **pre – desnitrificación** es la recirculación de un sistema a otro, cuando las aguas de tipo residual están en plan de tratamiento y comienzan el proceso de desnitrificación, ósea que esta agua viene de un reactor con zona aeróbica conteniendo nitratos y nitritos hacia otro reactor el cual tiene un ambiente anaeróbico, se reducen los nitratos y nitritos hacia nitrógeno orgánico. Para que esta parte del tratamiento tenga mucha más eficacia se espera que las aguas residuales ya salientes del proceso de la desnitrificación re circulen por medio de tubos y cañerías hacia el reactor de nitrificado (debemos tener en cuenta que esta vez se está pasando de una zona anaeróbica a una zona aeróbica), cuando el agua tratada comienza con la recirculación no solo lleva los compuestos nitrogenados que no se lograron reducir (nitratos y nitritos), si no, que también posee una gran carga de materia orgánica la cual es muy excedente, por consecuencia, esto genera una proliferación de bacterias heterótrofas. Para considerar el impacto del crecimiento de bacterias heterótrofas que no pertenecen al sistema o proceso en la zona aeróbica, debemos tener en claro que el aumento de la población de bacterias nitrificantes es sumamente lento, son muy sensibles a los cambios del medio además de necesitar mucho oxígeno, por lo tanto, si se generan bacterias de otro tipo y que sean heterótrofas o dependientes del oxígeno comenzaran a batallar por el consumo de este suministro en el agua, el consumo total del oxígeno disuelto podría llevar a una inactivación de las bacterias nitrificantes lo que tendría serias consecuencias en el tratado de los residuos. La solución para que esto no se transforme en un problema se basa en mantener una cantidad de oxígeno disuelto estándar además de agregar una fuente externa de carbonos orgánicos como metanol. (LLORET PARDO, J. A. I. M. E. "Estudio de alternativas para la ampliación de la depuradora de aguas residuales Alzira-Carcaixent mediante simulación con software Desass." (2015)).

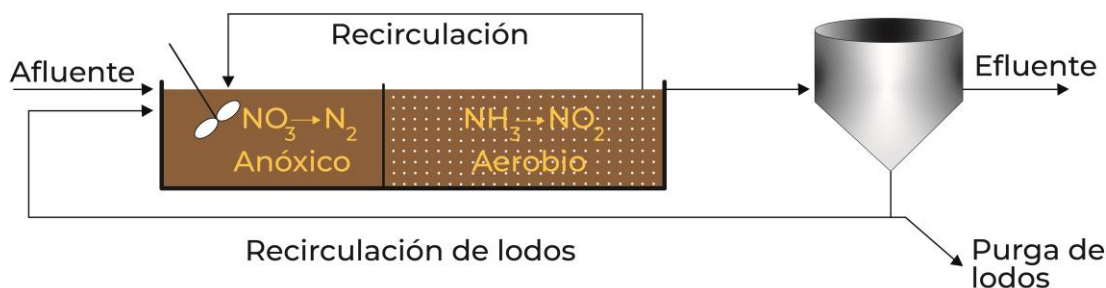


Figura 2: Pre - desnitrificación, sistema Ludzack - Ettinger. Fuente: Practical Wastewater Treatment, 2006.

Para la post - desnitrificación los reactores se encuentran en un orden donde en la primera parte se halla el reactor nitrificante y en segundo lugar el reactor desnitrificantes, el orden de los reactores resulta ser todo lo contrario al pre - desnitrificación donde la desnitrificación va primero y la nitrificación va segunda.

El efluente circula desde una zona aeróbica a una zona anaeróbica, por lo tanto, la materia orgánica que está contenida en el efluente se oxida, por consecuencia, en la zona con poca presencia de oxígeno es necesario administrar materia orgánica de forma externa para que la desnitrificación suceda. El suministro de materia orgánica se dispone en relación al DQO del efluente. La ventaja de la post - desnitrificación es el gran manejo que se puede tener de este proceso pero, a su vez, tiene una gran desventaja que significa una inversión considerable de dinero para la compra y uso del suministro de materia orgánica que se ingresa de manera externa a la zona anaeróbica. Este mecanismo o modo de desnitrificación es utilizado solo en los casos cuando la relación entre el DQO y el N sea realmente baja.

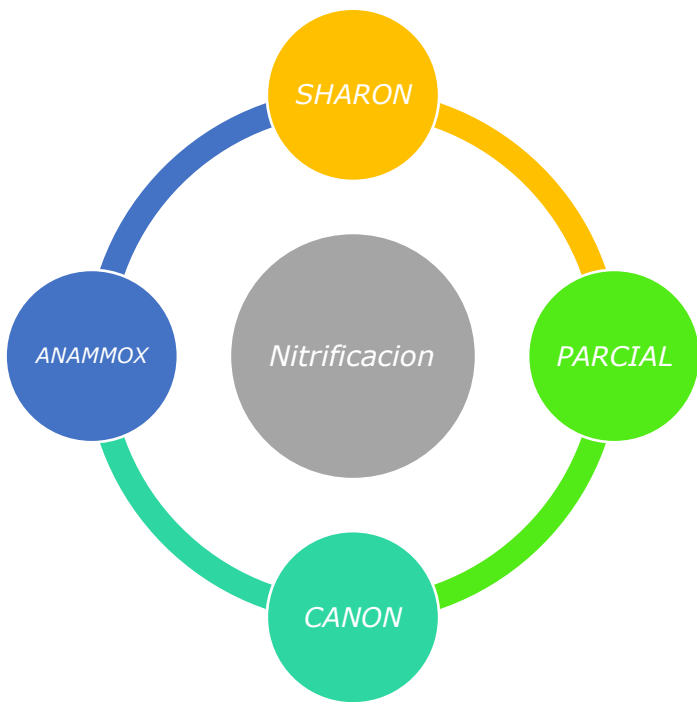


Figura 3: tipos de nitrificación

2.3.1.1 Nitrificación SHARON

El proceso de eliminación de compuestos nitrogenados, principalmente amoníaco o ion amonio, llamado nitrificación SHARON es uno de los tantos métodos que se han inventado y creado para el tratamiento de las aguas residuales de manera biológica que contengan una alta concentración de nitrógeno de tipo amoniacal que se halle en vías de seguir la ruta de la transformación a nitrito (Hellings et al., 1998). La característica principal que destaca este tipo de tratamiento se basa en la gran velocidad de desarrollo y crecimiento de los organismos oxidantes de amonio (AOB), La velocidad de proliferación de los AOB es superior al crecimiento de los microorganismos oxidantes de nitrito (NOB) en un medio donde la temperatura supera los 25°C. Esto permite trabajar solo dependiendo del tiempo de retención hidráulico (TRC).

El proceso de eliminación de nitrógeno SHARON es muy dependiente de los tiempos de retención celular e hídrica, trabaja con temperaturas entre los 30°C y los 40°C, en un medio donde el pH varía en 7 y 8, esto se realiza en un reactor de flujo continuo, mezcla completa (RCTA) y sin recirculación de fangos (Hellings et al., 1998). En este caso, donde los tiempos de retención son bajos, los NOB son eliminados con el caudal hídrico debido a que no existe un crecimiento suficiente de estos microorganismos. Gracias a estas condiciones y medios de trabajo, además, de los tiempos de retención de 24 horas se evita la producción de nitrato en el reactor (Mulder et al., 2001; Van Loosdrecht y Salem. 2006). Los microorganismos que se ven beneficiados por los tiempos de retención son los *Nitrosomas europaea* y los *Nitrosomas eutropha*. Esta configuración se utiliza para lograr reducir el alto contenido de N-amoniacal.

2.3.1.2 Nitrificación Parcial

La Nitrificación parcial es una de las configuraciones más convencionales para la eliminación del nitrógeno de manera biológica, este método se emplea en los casos donde la concentración de compuestos nitrogenados en el efluente es baja. Este tipo de tratamiento consta en la transformación de ion amonio a nitrato solo del 50% que se halle en el efluente o agua residual a tratar, tiene que existir una baja relación entre el DQO y el nitrógeno para determinar si este proceso es el indicado para el tratamiento, los efluentes que generalmente utilizan este método son los provenientes de efluentes de digestores de lodo, lixiviados de vertedero, efluentes de digestores anaeróbicos de origen industrial conservero. Para el funcionamiento optimizado de este proceso se enlaza una etapa de post – desnitrificación, por lo tanto, será necesario utilizar y emplear una fuente de materia organiza externa que sea administrada para que la desnitrificación cumpla de manera correcta. El hecho de que solo se transforme un 50% del ion amonio o amoníaco del efluente y, de igual manera, solo se elimine un cierto porcentaje del

nitrito transformado en nitrógeno gaseoso presenta un ahorro en la cantidad de oxígeno gastada de un 25%, además, de generar un 40% menos de lodos en comparación con otros sistemas de eliminación biológica del nitrógeno (*van Kempen, R & C R ten Have, C & Meijer, Sebastiaan & Mulder, Jan Willem & Duin, Olaf & Uijterlinde, Cora & van Loosdrecht, Mark. (2005)*)

En la figura 3 y 4 abordaremos las diferencias entre la nitrificación normal o común y la nitrificación simple, ya mencionadas en el párrafo anterior, para que esto se comprenda de una mejor manera:

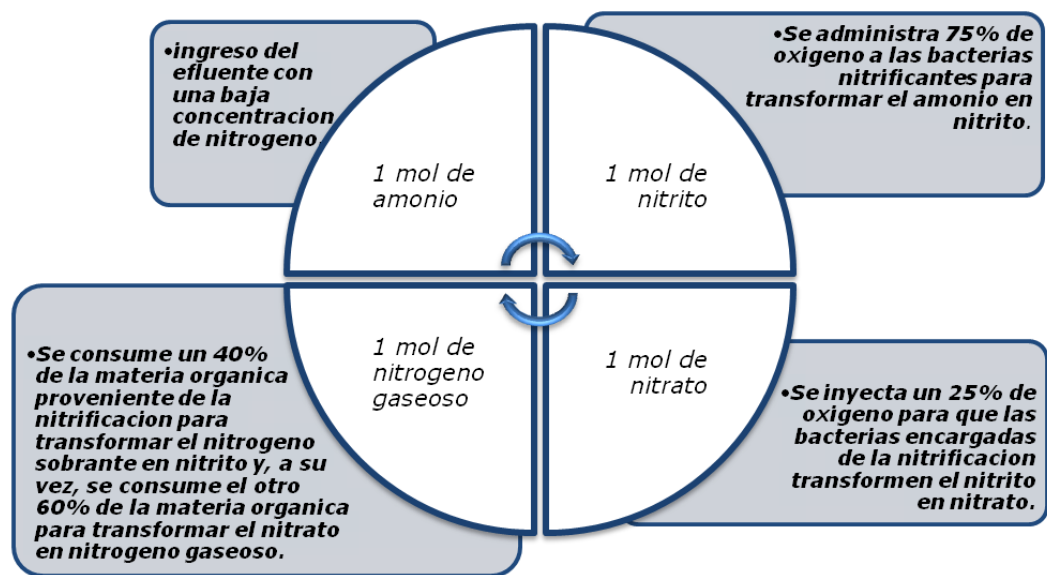


Figura 4: Proceso de nitrificación sin la aplicación de la nitrificación parcial. Fuente: Campos et al JEB, 2009.

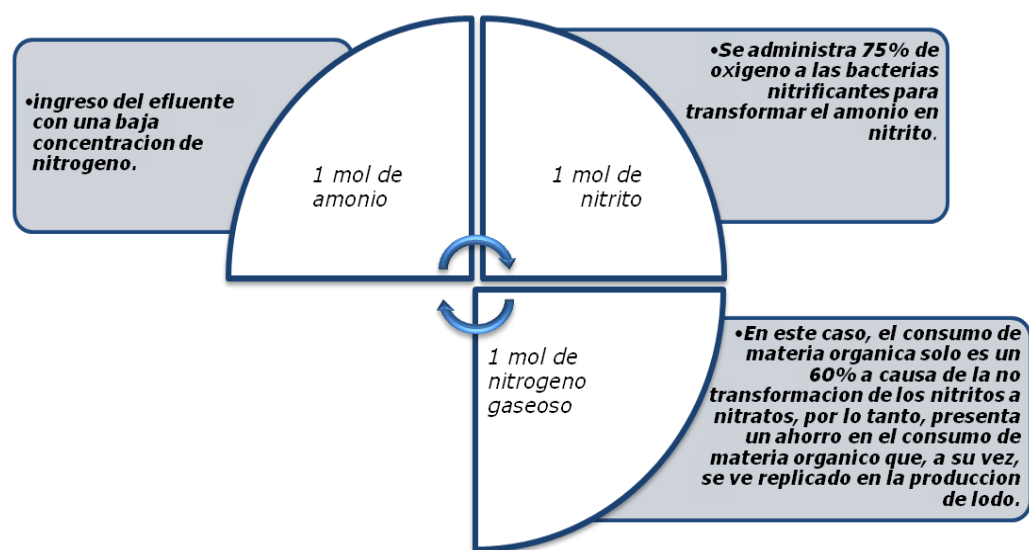


Figura 5: Proceso de nitrificación parcial. Fuente: Campos et al JEB, 2009.

2.3.1.3 Nitrificación Anammox

Anammox que en sus siglas respectivamente significa *Anaerobic Ammonium Oxidation*, es uno más del grupo de procesos biológicos para la eliminación del

nitrógeno. La nitrificación Anammox se diferencia a las otras formas de nitrificación que ya hemos visto por su particular medio en el cual se desarrollan las reacciones, que se quiere decir con esto, Anammox se halla en condiciones anoxicas donde algunos microorganismos transforman el amonio directamente en nitrógeno gaseoso utilizando al nitrito como aceptor final de electrones (Graff., 1995; Mulder., 1995).

Cuando se descubrió el sistema Anammox se oxidaba el NH_4^+ a nitrógeno gaseoso, pero, se utilizaba como aceptor de electrones el nitrato (NO_3^-), con el pasar del tiempo y tras varios experimentos, los científicos descubrieron que el aceptor de electrones más indicado para este proceso sería el NO_2^- y no el NO_3^- (Jin, 2008). Sin embargo, con el pasar de los años y la innovación en las pruebas y experimentos para la nitrificación Anammox han descubierto que el NO_2^- y el NO_3^- funcionan de igual manera como aceptores de electrones, por lo tanto, se han planteado dos vías hipotéticas para la transformación del amonio a nitrógeno gaseoso.

- a) **Hipótesis a:** el NH_4^+ es oxidado hasta transformarse en una Hidroxilamina, posteriormente, es oxidada a nitrito por las enzimas reductoras de Hidroxilamina (Hidroxilamina Oxidoreductorasa o HAO) (Kuenen., J.G.. (2008)). Luego de eso el amonio y el nitrito son oxidados a nitrógeno gaseoso.
- b) **Hipótesis b:** el NO_2^- se reduce por efecto de las enzimas nitrito Oxidoreductorasa a Hidroxilamina y, de manera desconocida, al reaccionar con el NH_4^+ es conducido a la producción de nitrógeno gaseoso. La Hidracina es utilizada de intermediario en este último paso (Jetten., 2001), la Hidroxilamina cumple con el papel de aceptor de electrones para así poder oxidar la Hidracina a nitrógeno gaseoso (Chamchoi., 2007)

En conclusión, si se halla o encuentra presencia de NH_4^+ y NO_2^- en igual cantidad de proporciones o cantidad similares, el conjunto de microorganismos pertenecientes a la comunidad Anammox pueden funcionar de manera eficiente para poder obtener y producir nitrógeno gaseoso (N_2). Existen algunos casos donde el agua residual presenta un alto contenido de amonio pero una baja cantidad de materia orgánica para oxidar, por lo tanto, las plantas de tratamiento combinan dos métodos de eliminación biológica del nitrógeno, La nitrificación Anammox y la nitrificación parcial. Esta unión de configuraciones presenta ventajas como:

- Se necesita un 40% menos de oxígeno.
- No hace falta una fuente de materia orgánica externa.
- Genera un 85% menos de lodo.

2.3.1.4 Nitrificación Canon

El sistema de nitrificación CANON, que en sus siglas significa *Complete Autotrophic Nitrogen removal Over Nitrite*, es uno más de los sistemas de eliminación biológica del nitrógeno. Esta reacción se lleva a cabo en un reactor de

reacción Anammox y parcial unificado donde prevalece la coexistencia entre microorganismos aeróbicos y anaeróbicos de tipo amonio oxidantes. En este caso, existe un límite de oxígeno muy bajo (*menos del 0,5% de oxígeno saturado en el aire*) esta baja concentración de oxígeno permite la oxidación del amonio a nitrito, pero, evita el paso a la reducción del nitrito al nitrato por las bajas cantidades de oxígeno, este porcentaje bajo de O₂ entrega las condiciones medio ambientales ideales para la reacción Anammox (*Nielsen et al., 2005*). Cuando hablamos de unificación en un reactor Canon (*Nitrificación Anammox y Nitrificación Parcial*) estamos diciendo que estos dos tipos de nitrificaciones ocurren a la misma vez dentro de un solo reactor, a causa, de que su naturaleza es similar. La ventaja que presenta el sistema de nitrificación CANON es el ahorro energético que es de un 63% gracias a la aireación, claramente este ahorro ocurre si se compara con los sistemas convencionales de eliminación del nitrógeno (*Liu et al., (2012)*)

2.3.1.5 Nitrificación SHARON + Anammox

Esta combinación de sistemas de nitrificación no se toma como un método de eliminación de nitrógeno único, por lo tanto, en la *figura 2* no sale como tal. La unión de la nitrificación SHARON y Anammox es un proceso de tipo autotrófico en el que las dos reacciones se llevan a cabo pero en distintos reactores de manera que actúen una simultáneamente después de la otra. En el primer reactor que vendría siendo el reactor de nitrificación SHARON se oxida la mitad de la concentración de nitrógeno que proviene del efluente por acción de las arqueas oxidantes de amonio (AOA) y bacterias oxidantes de amonio (AOB). Cuando ya ha sucedido y se ha completado la oxidación de la mitad del amonio a nitrito contenido dentro del efluente, este pasa a la siguiente fase que vendría siendo un reactor de nitrificación Anammox donde las bacterias de este tipo reducen los nitritos a óxidos nítricos. El óxido nítrico es combinado y mezclado con las enzimas Hidracina hidrolasa para la formación de un solo compuesto que sea la hidracina, cabe destacar que la hidracina hidrolasa y la hidracina son dos tipos de enzimas distintas que pueden parecer de nombre lo mismo pero no lo son, se pueden diferenciar en su estructura y en la función que cumplen en las configuraciones de nitrificación como en el medio ambiente. Cuando ya se tiene un solo compuesto que vendría siendo la Hidracina esta es oxidada a nitrógeno gaseoso por acción de las enzimas reductoras de hidracina (Hidroxilamina Oxidorreductorasa).

Claramente que de nombre puede parecer que este sistema está unido y trabajan a la misma vez pero en un solo reactor, cosa que no es muy posible por los distintos medios en los cuales se desenvuelven las reacciones. El sistema de nitrificación SHARON + Amannox presenta ventajas como costos más bajos en las operaciones, tiempos de aireación mas óptimos (*Jetten et al., 2001*), porcentajes mayores de eliminación de nitrógeno del efluente y emisiones más bajas de NO.

2.3.1.6 Nitrificación DEMON y Nitrificación OLAND

DEMON y OLAND son dos tipos distintos de métodos para la eliminación del nitrógeno. El sistema de eliminación por nitrificación DEMON es un proceso en el cual se realiza la eliminación de los compuestos nitrogenados del efluente pero con la característica que esta se completa en una sola vía. Consta de un solo reactor que, alternando en ambientes de aireación, no aireación y siendo controlado por el pH del medio logra la transformación del amonio a nitrógeno gaseoso. El pH está relacionado con la aireación de manera que cuando existe un alza del pH (pH mas acido) los tiempos de aireación disminuyen y así sucede de manera contraria donde el alza y la disminución del pH funcionan de manera indirecta y proporcional (Gonzales-Martinez et al., 2015).

Los expertos indican que el sistema DEMON logra un ahorro de energía del 25%, pero, que presenta problemas al arranque de esta configuración, esto es debido a la baja velocidad de crecimiento de las bacterias y al difícil control que presenta el proceso. Claramente si se logran superar las problemáticas que presenta en un inicio este sistema de nitrificación se puede obtener un gran método para eliminar el nitrógeno.

Por su parte, OLAND tiene la versatilidad de realizar los procesos en, ya sea, uno o dos reactores aunque presente una tasa de eliminación de nitrógeno mas baja si es que se le compara con los demás sistemas Anammox existentes. Cabe destacar, que OLAND es un sistema relativamente eficiente y de costos bajos, además, de tratar las aguas residuales con una alta concentración de amonio de manera directa.

OLAND es una de las formas de nitrificación que se encuentra en desarrollo aunque sea lento debido a la alta complejidad que presenta, pero esto no quiere decir que a futuro no sea uno de los procesos más utilizados para la eliminación biológica del nitrógeno.

Cada dia la contaminación está siendo mucho mayor de lo que pueden abarcar los sistemas de tratamientos para poder eliminar los elementos contaminantes. Por lo tanto, existen una serie de futuros procesos los cuales busquen dar solución a las problemáticas que suceden ahora y seguirán sucediendo por muchos años. El sistema OLAND y DEMON son claros ejemplos de configuraciones de tratamiento que se encuentran en vías de desarrollo para lograr una estabilidad y así ser parte de los sistemas de tratamiento más utilizados. Esta área que se encargada del desarrollo y las mejoras constantes de estos pequeños procesos en vías de crecimiento buscan la mayor eficiencia posible en cuanto a descontaminación y el mayor ahorro que pueda presentar como el consumo de energía eléctrica, el gasto en biomasas o cualquier otra fuente que se tenga que inyectar o ingresar de manera externa, ya que, eso significa un gasto extra para las empresas.

La idea, en un futuro no muy lejano, es tener el sistema de eliminación de compuestos contaminantes con mayor tasa de eliminación y esto es debido a que los sistemas del presente, como Anammox, no eliminan el nitrógeno por completo, tienen un margen de error que afecta al medio del reactor y esto resulta perjudicial para el proceso (Güven *et al.*, 2005; Qiao *et al.*, 2005).

Si analizamos cada uno de los procesos de nitrificación ya mencionados podemos realizar una comparativa entre ellos teniendo en cuenta factores como el crecimiento bacteriano, remoción de nitrógeno, alcalinidad, costo energético, tipos de bacterias y unos cuantos más.

Tabla 9: Comparación entre los distintos métodos de nitrificación biológica para la eliminación y disminución del nitrógeno en los efluentes.

	Nitrificación y desnitrificación tradicional	Nitrificación SHARON	Nitrificación SHARON + Anammox	Nitrificación OLAND	Nitrificación CANON	Nitrificación DEMON
Numero de bioreactores	2	1	pueden ser 1 o 2, dependiendo la necesidad	pueden ser 1 o 2, dependiendo la necesidad	1	1
Condiciones de oxígeno	Oxíco - Anóxico	Oxíco - Anóxico	Oxíco - Anóxico	El oxígeno se encuentra limitado	El oxígeno se encuentra limitado	El oxígeno se encuentra limitado
Alcalinidad	7,14	7,14	3,57	3,75	3,75	3,75
Porcentaje (%) de nitrógeno removido	95%	90%	90%	85%	90%	90%
Requisito de energía	Alto	Bajo	Muy bajo	Bajo	Bajo	Muy bajo
Costo de construcción	Alto	Bajo	Bajo	Muy bajo	Muy bajo	Muy bajo
Costo de remoción del nitrógeno	Alto	Medio	Muy bajo	Muy bajo	Muy bajo	Muy bajo
Tipos de bacteria que trabajan en la reacción	Amonio oxidantes, nitrato oxidantes y bacterias heterótrofas	Amonio oxidantes aeróbicas, bacterias heterótrofas y autótrofas	Plancto. Y amonio oxidante.	Bacterias nitrificantes autótroficas	Plancto. aeróbicos y bacterias amonio oxidantes	Plancto. aeróbicos y bacterias amonio oxidantes

Fuente: Rittmann and McCarty., 2001; Schmidt *et al.*, 2003; McCarthy *et al.*, 1969; Van Dongen *et al.*, 2001; Mulder., 2003.

Todos estos tipos de sistemas tienen una desventaja en común y es el prolongado tiempo que toma iniciar o arrancar una planta de tratamiento de agua con cualquiera de estas configuraciones a causa del lento crecimiento que presentan las bacterias Anammox. Esto, en cierta parte, se puede solucionar mediante el

cultivo de microorganismos Anammox en laboratorios para luego ser inoculados en los bioreactores, estos inoculas deben tener la cantidad de microorganismos mínima para dar inicio o arranque al reactor.

2.3.2 Factores que afectan a los distintos tipos de nitrificación.

Como ya sabemos, los procesos biológicos para la eliminación del nitrógeno son realizados por bacterias de distintos tipos, para el caso de los procesos de nitrificación anteriormente mencionados, los microorganismos más importantes son los llamados Anammox.

Las bacterias Anammox que se encuentran en el medio ambiente presentan una dificultad muy grande al momento de querer aislar un grupo de otro además de mostrar un crecimiento realmente lento y tedioso. La velocidad de crecimiento y la dificultad de poder encontrarlas en el ambiente presentan riesgos que se reflejan como una limitación para el enriquecimiento de los sistemas de nitrificación que empleen bacterias Anammox. Los factores que se acaban de mencionar suelen ser una problemática mayor al momento de querer arrancar o dar inicio a un sistema de nitrificación que emplee bacterias Anammox, pero el mayor reto para estas configuraciones comienza cuando ya está en marcha el funcionamiento del reactor, que se quiere decir con esto, los microorganismos Anammox son muy perceptibles a los cambios en el medio en el que se hallan como por ejemplo la concentración de amonio en el efluente, temperatura, pH, etc. Si uno de estos parámetros se altera puede tener consecuencias como la desactivación de la actividad microbiana parcial o completa y generar un cambio en las estructuras comunales de las poblaciones microbianas (*Jin et al., 2012*).

En cuestión de los problemas que se presentan en los sistemas Anammox, la gran mayoría suele ser para las plantas de tratamiento que solo emplean un biorreactor para todas las reacciones y esto es debido a la dificultad para mantener los factores dentro de los parámetros óptimos o aceptables que se requieran.

2.3.2.1 Factor 1: pH

El pH, como uno de los factores influyentes, trata de uno de los parámetros el cual cambia de manera repetida durante la eliminación autotrófica del amonio del efluente. Mientras sucede la nitrificación parcial, el medio tiende a tener un aumento por parte de la acidez del agua que, a su vez, tiende a acidificarse mucho más por acción del proceso de bacterias Anammox. A pesar de que existan muchas diferencias sobre los efectos del pH en la eliminación autotrófica del nitrógeno, parece que se ha llegado a un punto en donde todos los estudios que se han presentado, del efecto del pH, están de acuerdo y es sobre el pH óptimo para la acción de todos los microorganismos oxidantes. Según, (*Hellinga et al., 1998*), el pH ideal en el cual deben residir los microorganismos está entre 7 y 8, aunque cercano a pH 7 se presento una pequeña o diminuta variación en el crecimiento de las

bacterias nitrito reductoras, para los demás conjuntos de microorganismos estos cambios en la proliferación son algo tan pequeño que llega a ser difícil de percibir. La mayor actividad posible se registro a un pH de 7,5 y 8,0, esto se encuentra avalado por anteriores estudios que han demostrado y explicado que el pH optimo para los procesos biológico se encuentra en 8,0, además, de manifestar que los rangos de actividad para los microorganismos Anammox se encuentra entre 6,7 y 8,3 (*Strout et al., 2000; Jetten et al., 1999*) si el pH del medio se encuentra un poco más bajo o mucho más abajo que 6,7 las bacterias Anammox perderán su actividad, por lo tanto, quedaran inactivas.

2.3.2.2 Factor 2: Temperatura.

La temperatura es una variable con mucha importancia dentro de estos procesos debido a que influye de manera mucho más directa que el pH en el funcionamiento de los microorganismos en la eliminación del nitrógeno, metabolismo y en la estructura comunal microbiana. Es de suma importancia captar y lograr entender sobre el comportamiento de las bacterias Anammox cuando se busca la optimización realizando variaciones de la temperatura (*Hu et al., 2013a; Gonzales-Martinez et al., 2016b*).

Disminución de la temperatura: cuando los microorganismos Anammox son sometidos a una baja de temperatura se desencadenan una serie de problemas que se verán reflejados en el proceso biológico para la eliminación del nitrógeno. La disminución de la temperatura hace que la relación entre la oxidación y el crecimiento bacteriano sufra una disminución, por lo tanto, la actividad microbiana se detiene o desactiva.

Aumento de la temperatura: cuando los microorganismos Anammox sufren un aumento en los grados C° del medio suelen sufrir daños estructurales que son irreparables e irreversibles debido a la destrucción que se produce en las células bacterianas (*Dosta et al., 2008*).

Los distintos análisis que se han realizado en base a la optimización de las bacterias para la oxidación del amonio difieren en ciertos puntos y uno de estos es sobre la temperatura optima en la cual los microorganismos Anammox alcanzan el mayor punto de optimización y trabajo. Parte de los investigadores que aventura en esta materia dice que la temperatura optima de trabajo parte de los 35°C y termina en los 40°C, sobre los 40°C existe un punto muerto que va hasta los 45°C donde luego de eso comienza la lisis celular bacteriana. Según, (*Lotti et al., 2015a*), la temperatura en la cual deben emplearse los sistemas Anammox va desde 30°C hasta los 35°C, pero, todo va a depender de los tipos de bacterias debido a que existe una variación en la adaptación y aceptación de la temperatura.

Por ejemplo, las *Candidatus* Kuenenia demostraron tener un punto de optimización mayor a los 37°C (*Narita et al., 2017*) mientras que las *Candidatus*

Brocadia obtuvieron una mayor y mejor actividad a los 40°C (Strous et al., 1999) Gracias a que todos estos estudios han demostrado que las temperaturas sobre 30°C y bajo de los 40°C resultan optimas para el trabajo de los sistemas Anammox, la búsqueda de avances para estos mismos sistemas solo se realiza dentro de esas temperaturas. La otra parte de los analistas e investigadores que busca, de igual manera, obtener avances para estos sistemas ha probado y experimentado que los problemas para las bacterias Anammox sucede cuando se trabaja bajo los 15°C desencadenando una aglomeración de NO_2^- y, a la misma vez, obteniendo una pérdida del control del sistema (Dosta et al., 2008; Gonzalez-Martinez et al., 2016).

Las bacterias, como organismo de diminuto tamaño no perceptible para el ojo humano a simple vista, tienen la habilidad para adaptarse a distintas situaciones, que se quiere decir con esto, los microorganismos Anammox pueden auto capacitarse para sobrevivir en entornos que no les resulten cómodos y de igual manera trabajar en la oxidación del nitrógeno en forma de amonio a 20°C mostrando excelentes resultados en base a la eliminación del nitrógeno, pero al ser una temperatura bajo los 30°C existe de forma latente un posible descontrol del sistema (Gonzalez-Martinez et al., 2016)

2.3.2.3 Factor 3: concentración de nitritos

La concentración de nitritos es una de las variables con gran importancia con la cual se controlan los sistemas Anammox, ya que cuando suceden incrementos repentinos de las concentraciones de este mismo compuesto se tiende a inhibir su actividad. Cabe destacar que no existe ninguna semejanza o relación entre los valores de nitrógeno y su porcentaje de inhibición, en una de las investigaciones que se realizo para evaluar la inhibición de los sistemas Anammox por alta concentración de nitritos, se descubrió que por 350 mg de Nitrógeno por litro de efluente se inhiba un 50% del proceso mismo pero, de igual manera, en una de esas investigaciones buscando razones numéricas para la inhibición por concentración de nitrato se obtuvo que en 100 mg de Nitrógeno se inhibió un 100% el sistema Anammox (Strous et al., 1999).

La inhibición de los sistemas Anammox, según artículos e investigaciones de Stros et al.1999 y Egli et al.2001 donde se utilizo *Candidatus Brocadia Anammoxidans*, mostraron que la inhibición no solo dependerá de la concentración de los nitritos o su aumento, si no, que también de la especie de bacteria oxidante con la que se esté trabajando como por ejemplo los resultados que obtuvieron con *Candidatus Kuenenia stuttgartiensis* con la cual se concluyo que las concentraciones que superan los 182 mg de Nitrógeno por Litro de efluente comienzan a inhibirse.

2.3.2.4 Factor 4: Salinidad

El alto porcentaje de salinidad en las aguas residuales de origen municipal se mide mediante la conductividad eléctrica que esta posea, frecuentemente se suele hallar dentro de un rango que varía entre $0,7 \text{ mS cm}^{-1}$ y los $3,0 \text{ mS cm}^{-1}$. (Rodriguez-Sanchez et al. 2017). De manera muy reiterada, los efluentes provenientes del uso humano y los que vienen del uso industrial suelen proveer de altas concentraciones de NaCl que, según varios autores a cargo de investigar sobre la influencia de la salinidad en el agua, han demostrado que esta afecta directamente en el rendimiento de las poblaciones microbianas y su energía. (Cortes-Lozano et al., 2012)

En la última década, el estudio sobre la salinidad en las aguas residuales ha sido foco de gran interés por parte de los especialistas en este tema que han demostrado, basados en resultados experimentales, que la salinidad si afecta a los procesos microbiológicos con la condición de que todo dependerá de la concentración de este factor. Según, (Yang et al., 2011), las aguas residuales que contienen una concentración relativamente media de salinidad ($15 \text{ g de NaCl L}^{-1}$) no afectan a los microorganismos Anammox, por lo tanto, se obtuvo un rendimiento satisfactorio bajo esta condición y no se percibió alteración alguna en las tareas y trabajos Anammox (Dapena-Mora et al., 2010).

Habitualmente, las plantas de tratamiento de aguas utilizan técnicas de eliminación autotrófica de nitrógeno para tratar los efluentes de origen industrial que se hallan bajo condiciones extremas como temperaturas altas y lecturas de salinidad muy elevadas, esto es debido a que los sistemas autotróficos han entregado eficientes resultados de eliminación de nitrógeno y por tener la capacidad de funcionar en este tipo de situaciones teniendo una concentración de salinidad de hasta $30 \text{ g de NaCl L}^{-1}$ (Dapena-Mora et al., 2010).

Dentro de las investigaciones que se llevaron a cabo por (Gonzalez-Silva et al. 2017) concluyeron que las poblaciones Anammox reaccionan de distinta manera frente a la misma concentración de salinidad, como por ejemplo las *Candidatus Brocadida* presentaron un mayor dominio en una salinidad que se halla entre 0 y $3 \text{ g de NaCl L}^{-1}$ mientras que las *Candidatus Kuenenia* exhibieron una superioridad hasta concentraciones de $30 \text{ g de NaCl L}^{-1}$. Las conclusiones que se obtuvieron gracias a estas observaciones sugieren que los conjuntos de microorganismos Anammox suelen tener la habilidad para poder adaptarse a una variable cantidad de ambientes y condiciones de salinidad pero teniendo distintos efectos dentro de las mismas comunidades microbianas del tipo Anammox.

2.3.3 Desnitrificación biológica del nitrógeno.

La desnitrificación, como se ha mencionado anteriormente, es un proceso el cual tiene por objetivo la reducción del nitrato a nitrógeno gaseoso o cualquiera de

los productos resultantes de la reducción del nitrato como el óxido nítrico, óxido nitroso, etc. Esto sucede en distintas fases que son catalizadas por los distintos sistemas enzimáticos encargados de que suceda la reacción y el nitrato sea reducido, los microorganismos que tienden a destacar en un reactor de desnitrificación son los: *Thiobacillus*, *Pseudomonas*, *Alcaligenes*, *Thiosphera* y los *Paracoccus*, no son los únicos pero son los que suelen resaltar más que los demás.

Para lograr la reducción de los nitratos contenidos en el efluente de aguas residuales existen distintas alternativas como los procesos fisicoquímicos y los procesos de desnitrificación biológica. Para el caso de los sistemas fisicoquímicos desnitrificantes existen opciones como la ósmosis inversa, intercambio iónico y la destilación, estas distintas elecciones presentan una complejidad mucho mayor si se les compara con los procesos biológicos, sumándole a eso, necesitan estar en constante mantenimiento ya que son muy perceptibles a los errores y desconfiguraciones, suelen tener valores agregados fuera del presupuesto por distintas razones (Moon et al., 2004), no tienen selectividad con los residuos y producen desechos que contienen altos niveles de nitritos o también nitrato.

A diferencia de los procesos fisicoquímicos, los sistemas biológicos son los más utilizados para la eliminación del nitrógeno en las plantas de tratamiento de agua, esto es a causa de las ventajas que da el uso de esta tecnología en temas como costos, selectividad y generación de residuos en comparación con los fisicoquímicos (Mahmood et al., 2007; Moraes et al., 2012). El principal objetivo de la desnitrificación biológica es la disminución y la reducción de la concentración de compuestos de nitrógeno del efluente.

La desnitrificación biológica comúnmente usada para la disminución de las concentraciones de compuestos nitrogenados, como nitrato y nitrito, trabajan bajo el funcionamiento de bacterias de tipo heterótrofas que se hallan en condiciones anoxicas (Sun y Nemati., 2012). Por muy usados que sean estos sistemas, no están libres de las desventajas ya que aun no logran ser procesos lo suficientemente perfectos como para solo generar beneficios. Hasta el momento, existen dos inconvenientes que suelen tener una leve diferencia de impacto en el proceso, la más visible es el alto costo energético y monetario que genera la aireación prolongada cuando los efluentes provienen con cargas muy elevadas de nitrógeno. El segundo inconveniente no resulta muy perceptible en un primer momento y es cuando no se alcanza una razón entre el nitrógeno y el carbono suministrado, esto sucede por culpa de la fase anterior a la desnitrificación que tiene por objetivo reducir la materia orgánica del efluente, por lo tanto el uso de carbono en esa fase termina dejando una deuda de carbono que no es fácil de rellenar. Existen casos especiales para las aguas residuales en donde se suele generar un gasto un poco mayor que de costumbre y es cuando se trata cierto tipo de aguas que generalmente son generadas por la industria de los fertilizantes, la característica que tiene este tipo de residuo y que lo hace tener costos adjuntos a su tratamiento es la poca

concentración o carga de compuestos orgánicos que suelen ser utilizados como combustible en la desnitrificación (Manconi et al., 2007). Cuando las plantas de tratamiento suelen encontrarse con este tipo de aguas residuales se opta por emplear fuentes de carbono externas como metanol o azúcares para que la desnitrificación pueda ser llevada a cabo.

Al igual que en la nitrificación, la desnitrificación tiene distintas opciones para ser empleadas en los sistemas de tratamiento de aguas residuales que son un tanto menos complicadas que las alternativas de la nitrificación, a continuación vamos a presentar los tipos de desnitrificación mas empleadas por la industria de tratamiento de residuos:

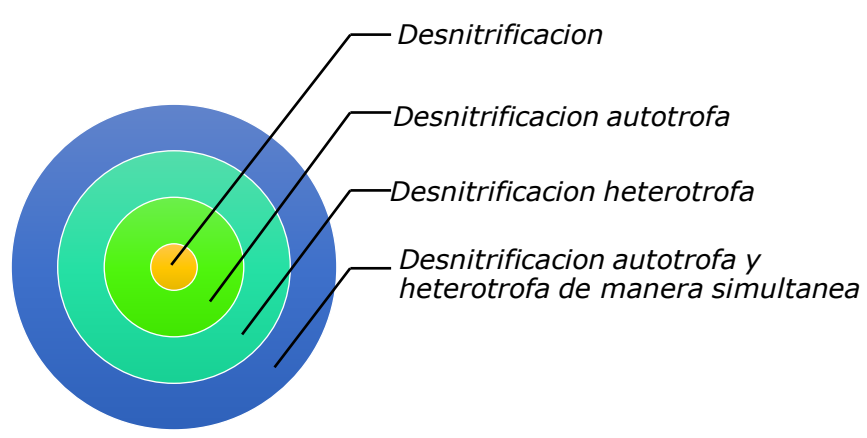


Figura 6: tipos de desnitrificación.

2.3.3.1 Desnitrificación heterótrofa

La desnitrificación heterótrofa es el primero de los sistemas para la reducción de los compuestos nitrogenados a nitrógeno gaseoso con la particularidad que en este caso se debe, por obligación, emplear una fuente de carbono externa como un alcohol primario, compuestos con grandes cantidades de azúcar o bicarbonato. El ente que sea aplicado desde fuera del proceso funcionara de dos maneras:

- Fuente de energía (*donante de electrones*).
- Fuente de carbono de materia orgánica degradable.

Todo donante de electrones necesita un receptor, para este caso, el NO_3^- funciona como el organismo que recibirá los electrones para reducirse a N_2 bajo condiciones donde el oxígeno se encuentra casi agotado por el consumo que realizan las bacterias heterótrofas dentro del reactor.

Esta alternativa resulta ser una buena elección para desnitrificar aguas residuales debido a que tiene un coste relativamente bajo si se le compara con las demás opciones existentes para la desnitrificación, se puede emplear en reactores de bajo o medio volumen y además tiene una tasa de eliminación de nitrógeno muy alta. Sin embargo, la desnitrificación heterótrofa solo es una preferencia cuando se habla de tratamiento enfocado en aguas residuales, esto es a causa de la cantidad

de residuos de carbono que produce lo cual terminaría por contaminar el agua potable.

En el transcurso en el que ocurre la desnitrificación sucederán diversas etapas donde se verán empleadas varias enzimas reductoras que trabajan una después de la otra de manera continua, el nitrógeno pasara por distintas reducciones que se verán representadas en la siguiente secuencia (Slikers et al., 2002):



Figura 7: proceso de reducción del nitrato a nitrógeno gaseoso.

La desnitrificación que comienza partiendo del nitrito y que tiene como objetivo y punto final el nitrógeno gaseoso, son realizadas por distintas enzimas que solo se encargan de reducir un compuesto en específico:

Tabla 10: Enzimas encargadas de reducir los compuestos de nitrógeno en la desnitrificación heterótrofa.

Compuesto reducido	Enzima encargada de la reducción
Nitrato (NO_3^-) a Nitrito (NO_2^-)	Nitrato reductasa
Nitrito (NO_2^-) a Oxido Nítrico (NO)	Nitrito reductasa
Oxido Nítrico (NO) a Oxido Nitroso (N_2O)	Oxido nítrico reductasa
Oxido Nitroso (N_2O) a Nitrógeno gaseoso(N_2)	Oxido nitroso reductasa

La acción de estas enzimas sucede bajo condiciones donde la cantidad de oxígeno disuelto o cualquier otra fuente de oxígeno que se halle dentro del medio son netamente bajas o casi nulas. Si una cantidad de oxígeno concentrada se llegase a filtrar hacia dentro del estanque de desnitrificación sucederían dos consecuencias, el primer problema sería la liberación de parte del oxido nitroso que se halla en el reactor lo cual presentaría una grave problemática para el medio ambiente, esto es a causa de que el oxido nitroso o N_2O es uno de los gases de efecto invernadero culpable del calentamiento global. El segundo problema sería la desactivación o inhibición de las enzimas reductoras de compuestos de nitrógeno, cabe recordar que la presencia de oxígeno para sistemas que se encuentran en condiciones anoxicas es lo equivalente a lo que es el monóxido de carbono para los humanos.

La desnitrificación heterótrofa al ser un proceso que funciona de etapa en etapa tiene ciertos riesgos agregados como la acumulación de productos que no lograron ser reducidos y quedaron a mitad del proceso (NO_2^- , N_2O y NO) esto puede ser a causa de las condiciones en las cuales se está llevando a cabo la operación (*pH, temperatura, tiempos de aireación, tiempos de retención celular, etc*) o la calidad y concentración del sustrato que se está aplicando. Lo anteriormente mencionado son propiedad de los factores que afectan a la operación pero de manera externa, en base a esto, existen variables que influyen pero de manera interna y directa como la concentración de O_2 disuelto, las fuentes de carbono orgánico degradables, la concentración de los compuestos nitrogenados en el efluente, presencia de elementos tóxicos y la conexión de las concentraciones entre el nitrógeno y el carbono. Todo lo que recientemente se menciona pueden ser las causas principales para que suceda una acumulación en los compuestos que no lograron ser reducidos (*Decheco y Egusquiza., 2011*)

Varios investigadores se han enfocado en buscar una razón en específico del cual sea el posible causante de esta acumulación de compuestos, cuando llego la hora de sacar resultados de cada una de las investigaciones que se llevaron a cabo, sobre este tema, fue que el pH es uno de los factores ambientales más influyentes que los demás. Este veredicto se obtuvo por dos pruebas que constaban en realizar un cultivo en dos recipientes distintos con dos métodos diferentes, en el recipiente 1 se utilizo el método de cultivo Batch y en el recipiente 2 se aplico el método de cultivo en continuo.

El recipiente 1 que presentaba el método de cultivo Batch se expuso a condiciones donde el pH se hallaba en 6 o podía variar en números menores a 6, cuando se realizo esta variación ambiental el cultivo mostro una tendencia a acumular acido nitroso (HNO_2) que resulta ser muy toxico para las bacterias desnitrificantes, si se acumula en una cantidad relativamente perceptible puede terminar por eliminar a las bacterias y generar errores irreversibles.

Por otra parte, el recipiente 2 se hallaba bajo el método de cultivo continuo, exhibió ciertas observaciones en donde se obtuvo que en este lado de la investigación no se encontró una acumulación de productos o desechos no deseados dentro de un rango de pH entre 6 y 9, aunque, en el momento en que se comenzó a descender el pH se provoco una inhibición total del sistema (*Pérez., 1998*). Debemos destacar que la desnitrificación sucede en un pH alcalino por el uso de los protones de hidrogeno.

En base a todas las observaciones que hemos tratado sobre la desnitrificación heterótrofa, los problemas y las consecuencias de la acumulación de residuos podemos concluir que esto no es una cuestión que solo englobe a las enzimas, recordando que la acumulación puede causar problemas de inhibición de las enzimas, si no que tiene que ver en cierta manera los factores ambientales o condiciones de cultivo externos e internos (*Cervantes-Carrillo et al., 2000*)

2.3.3.2 Desnitrificación autótrofa

La desnitrificación autótrofa es el segundo método de reducción de compuestos nitrogenados para su eliminación que abordaremos en este trabajo de título, de partida, este método consta con una versatilidad especial porque tiene la cualidad de poder eliminar compuestos nitrogenados como los ya mencionados mucho antes y de eliminar compuestos de azufre simultáneamente (*Manconi, I., Carucci, A. and Lens, P. 2007*). La desnitrificación autótrofa para tratar aguas residuales es la más utilizada cuando estas aguas cuentan con una alta concentración de compuestos de nitrógeno en donde la presencia de materia orgánica sufre una gran deficiencia (*Sun, Yimin & Nemati, Mehdi., 2012*)

La acción de la desnitrificación autótrofa es posible gracias al trabajo de bacterias desnitrificantes, como todo ser vivo, estas bacterias necesitan energía para trabajar la cual obtienen gracias al efecto de la oxidación – reducción de los elementos de nitrógeno o azufre que sirven como donadores de electrones (*Li et al., 2009*).

La reducción simultánea entre el nitrógeno y el azufre es posible gracias a la eliminación autótrofa. Este sistema sincrónico consiste en la reducción de los compuestos nitrogenados como el NO_3^- o NO_2^- a nitrógeno gaseoso utilizando como dador de electrones los compuestos azufrados como el tiosulfato, azufre y el ácido sulfhídrico. El uso de los compuestos de azufre como dadores de electrones proporciona de resultado el sulfato que, si se compara con el nitrato, presenta una toxicidad mucho más baja lo cual es menos perjudicial para el medio en especial para las aguas admisibles para el vertido.

Cuando se habla de sistemas de desnitrificación de aguas residuales se suelen comparar sus funciones con los demás sistemas para ver las ventajas que proporciona uno sobre el otro y así poder realizar la implementación de un proceso en específico, en este caso, mostraremos las ventajas que existen del sistema de desnitrificación autótrofa por encima del sistema de desnitrificación heterótrofa.

Ventajas del sistema de desnitrificación autótrofa sobre el sistema de desnitrificación heterótrofo:

- El sistema DA es independiente a las fuentes de carbono externas, por lo tanto, la existencia de un emisor de carbono externo no es necesario.
- La existencia del azufre en los efluentes presenta una ganancia económica para las industrias de tratamiento debido a que el azufre funciona como dador de electrones, por lo tanto, no se debe gastar en organismos que cumplan esta función.
- Aunque no se detalle tanto en este trabajo de título, existe un costo asociado para los tratamientos con el cual se costea la logística y gestión que se hace para eliminar los residuos que produce la nitrificación y la desnitrificación, como el sistema DA genera una diminuta cantidad de lodo como desecho no

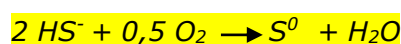
se debe gastar e invertir tanto dinero para la eliminación de estos productos no deseados.

La desnitrificación autótrofa se basa en el trabajo de las bacterias desnitrificantes de tipo *Thiobacillus* y *Thiomicrospira*, estos microorganismos tienen la cualidad de ser de carácter mesófilos, por lo tanto, tienen un rango de temperatura estándar y una variación de pH muy diminuta. Las bacterias desnitrificantes muestran un mejor trabajo a temperaturas entre 25°C y 35°C, lo cual refiere que esta es la temperatura óptima para el desarrollo de este tipo de bacterias y la reducción de los agentes nitrogenados.

En el caso de la desnitrificación heterótrofa, existía una dependencia donde este sistema tenía que recibir un suministro constante de fuentes de carbono que serviría como combustible para las bacterias. En la desnitrificación autótrofa no existe la dependencia del sistema en si con una fuente de carbono, por el contrario en la desnitrificación autótrofa, es necesaria la presencia de un suministro o fuente que controle la alcalinidad, como el bicarbonato o carbonato de calcio. La función principal de los compuestos alcalinos que ira recibiendo externamente el reactor de desnitrificación autótrofa será la neutralización de los protones que se van a ir produciendo por el constante funcionar y acción de las bacterias.

Las bacterias desnitrificantes ya mencionadas pueden utilizar y consumir el oxígeno para la oxidación de los compuestos de azufre, el producto que se obtendrá de la oxidación de los compuestos azufrados dependerá directamente de la cantidad de oxígeno que exista en el medio, que se quiere decir, que si la concentración de oxígeno en el medio es baja se obtendrá un resultado muy distinto a un medio donde la concentración de oxígeno es lo suficientemente para decir que es alta. Para el caso donde el oxígeno es bajo, todo producto azufrado contenido en el efluente tendrá la tendencia de ser oxidado parcialmente a Azufre (S^0), en cambio, cuando la concentración de oxígeno es "alta" la tendencia de oxidación cambia para obtener como resultado sulfatos, a continuación se pueden apreciar las dos reacciones (*a* y *b*) estequiométricas y observar la diferencia entre la concentración de oxígeno.

Reacción a: oxidación de compuestos de azufre en baja concentración de oxígeno



Reacción b: oxidación de compuestos de azufre en alta concentración de oxígeno



Cuando el objetivo de la desnitrificación autótrofa es la eliminación de los nitratos por ningún motivo debe existir una concentración de oxígeno ni alta ni baja debido a que las bacterias sentirán atracción y preferencia por el oxígeno que se hallara disuelto, por lo tanto, no se generara una reducción del nitrato.

Los experimentados en este tema constantemente están en busca de nuevas tecnológicas para los sistemas de desnitrificación, entre tanta búsqueda se halló que el azufre en si, como elemento, podría resultar ser una buena fuente de energía y que al aplicarse en la desnitrificación entregaría buenos resultados (*Tang et al., 2010*), disminuiría los costos, se emplearía un elemento el cual no es toxico, tiene la característica de ser insoluble en agua, es estable si se trabaja en las condiciones correctas y es fácil de conseguir en forma de mineral.

Para la DA con una fuente de energía de azufre, se observó que la relación Azufre/Nitrógeno era el foco de mayor importancia en la desnitrificación autótrofa. Frente a lo observado por los investigadores se decidió pasar a otro plano con este sistema especial, en donde se jugó con distintas relaciones entre el Azufre y el Nitrógeno para ver en que variaban las reacciones o de qué manera afectaba a los procesos, se probó una selección de relaciones S/N utilizando como agente dador de electrones el tiosulfato y un compuesto nitrogenado como el Nitrato como aceptor de estos mismos (*Oh et al. 2006*). El resultado para las relaciones donde el azufre era el agente limitante y se hallaba en cantidades menores a 6,5 gramos de azufre por gramo de nitrógeno (*6,5g de S/g N*) la desnitrificación solo llegaba hasta la reducción del nitrato a nitrito y concluía sin la reducción de este último producto, mientras que sobre los 6,5 gramos de azufre el proceso funcionaba de manera optima completando la desnitrificación por completo y obteniendo como resultado nitrógeno gaseoso, por lo tanto es necesario y sumamente importante llevar un control expedito sin descuidar un solo momento la relación entre el azufre y el nitrógeno.

A pesar de que la desnitrificación autótrofa sea una de las elecciones principales en las plantas de tratamiento de agua, esta presenta ventajas, como las ya mencionadas anteriormente, y desventajas. A continuación representaremos un cuadro comparativo entre las ventajas y las desventajas de la DA:

Tabla 11: Ventajas y desventajas presentes en la desnitrificación autótrofa para la eliminación de compuestos nitrogenados y sulfurados.

<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>
<i>Si se compara con la desnitrificación heterótrofa o cualquier otro sistema, la mayoría son dependientes de fuentes de carbono externas generando un gasto mayor, por el contrario, la desnitrificación autótrofa solo necesita una fuente de productos alcalinos externos que no generan un gasto importante por el valor existente de estos suministros.</i>	<i>La mayoría de las aguas residuales contiene una alta concentración de compuestos nitrogenados y azufrados, el único problema es que los compuestos vienen en forma de sulfuros, que al estar en cantidades diminutas ocasiona problemas de inhibición de la desnitrificación, y en forma de amoníaco que primeramente debe ser nitrificado para ser reducido en la desnitrificación.</i>

<i>Se puede utilizar el azufre como fuente de energía debido a su bajo costo, el metanol y el ácido acético presentan un precio mayor en el mercado, por lo tanto, es necesario invertir una cantidad de dinero mayor para su compra. La poca inversión para la compra del azufre presentara una reducción en los costos de operación general.</i>	<i>Las aguas residuales que contienen con una alta concentración de nitratos generan, de manera directa y proporcional, una alta concentración de sulfatos que a la exposición prolongada y en presencia de desarrollos de zonas anaeróbicas podría resultar en una formación de sulfuros.</i>
<i>Debido a que los microorganismos de la desnitrificación autótrofa pueden utilizar bisulfuros, azufre y tiosulfato como dadores de electrones, producen una cantidad mucho menor de lodos lo cual se ve reflejado en los gastos de gestión y logísticos para la eliminación de estos mismos.</i>	<i>El uso de compuestos azufrados está predeterminado, o sea, solo existe una variedad mínima de compuestos que se pueden utilizar como el HS^-, $S_2O_3^{2-}$ o S, cuando el efluente contiene una concentración de productos de azufre que no son posibles oxidar o trabajar aumenta la emisión de lodos a causa de la proliferación de las bacterias filamentosas.</i>

Fuente: Campos et al., 2008.

2.3.3.3 Desnitrificacion autótrofa y heterótrofa de manera simultanea

Generalmente, las aguas residuales provenientes de las plantas industriales suelen tener una alta concentración de compuestos nitrogenados y azufrados. Por lo tanto, para su tratamiento se busca la forma de disminuir su concentración sin tener un impacto negativo en el medio ambiente. Para esto existen tres opciones que son los tratamientos biológicos, físicos y químicos, estos dos últimos suelen ser utilizados en casos especiales ya que generan, de por sí, una cierta cantidad de desechos contaminantes de difícil eliminación. Los tratamientos biológicos son la opción más viable en las plantas de tratamiento de agua debido a ciertos beneficios como el bajo consumo de energía para la aireación, la baja producción de desechos, una tasa alta de eliminación de desechos objetivos contenidos en el agua y la versatilidad para eliminar compuestos simultáneamente.

La desnitrificación autótrofa y heterótrofa simultánea significa, en pocas palabras, la convivencia entre dos tipos de bacterias que tienen un mismo fin pero son de distintos ambientes, la unión entre dos entornos busca principalmente la eliminación del nitrógeno y del azufre sin tener que realizar más de una acción. En este proceso, los compuestos azufrados sufren la oxidación a azufre elemental y los nitrógenos la reducción a nitrógeno gaseoso. La armonía del sistema para tratar estos dos compuestos a la misma vez solo resulta fácil teóricamente, cuando esta configuración es aplicada en un biorreactor se debe tener en cuenta los factores ambientales internos y externos pero el más importante de todos los factores es la

relación entre S/N. Este último factor mencionado anteriormente predomina en cuanto a importancia debido a que es quien limita el crecimiento de las bacterias autótrofas y heterótrofas, el desarrollo de estos tipos de microorganismos debe verse limitado en partes iguales ya que si una predomina sobre la otra consumirá todo el alimento que se halla en el biorreactor, que en este caso es el nitrito, lo que desencadenara errores de tratamiento y fallas en la eliminación del nitrógeno o el azufre.

Como en todos los procesos de tratamiento de aguas se realizan distintas investigaciones y experimentos. Para el caso de la desnitrificación autótrofa – heterótrofa simultanea existe muy poca evidencia o estudios que se refieran a este tema de lleno, uno de las investigaciones más destacadas tenía como objetivo ver a qué punto llegaba la reducción del nitrito utilizando acetato como fuente de carbono y, a su vez, demostrar el efecto del sulfuro. Cuando los suministros de acetato y sulfuro se administraron se exhibió una reducción del nitrito que, parcialmente, solo llego hasta nitrato debido a la acumulación del nitrito no reducido en el sistema (*Gommers et al., 1988*), El acetato que era administrado como fuente externa fue consumido completamente por los microorganismo y el sulfuro contenido en el efluente fue oxidado a sulfato en un 100% pero sin obtener el producto objetivo que es la oxidación a azufre elemental.

La velocidad de reacción de las distintas oxidaciones y reducciones va a depender directamente del ambiente en el que se encuentre y de la cantidad de bacterias que se han desarrollado. La oxidación de los compuestos azufrados a azufre elemental y el consumo del acetato transformado a dióxido de carbono se da mucho más rápido si se trabaja en una vía de desnitrificación autótrofa, en cambio para el nitrógeno, la reducción de nitrato a nitrógeno gaseoso ocurrirá muchísimo más rápido si se halla en una vía de desnitrificación heterótrofa. La dificultad de mantener estos dos ambientes trabajando unido uno al otro o de manera simbiótica se soluciona introduciendo un inóculo con una cantidad de bacterias suficientes para que no exista un dispar entre estos microorganismos e induciendo alimento o suministro suficiente.

Como existe tan poca evidencia de este sistema y, de igual manera, no es utilizado recurrentemente en las plantas de tratamiento de aguas, recurrimos a solo exhibirlo como un tema leve y con mucho menos importancia comparado con los dos sistemas anteriormente mencionados. Claramente es bueno tener en conocimiento que existe la posibilidad de mantener dos sistemas de desnitrificación distintos trabajando en un solo reactor para cumplir con un solo objetivo, la reducción o eliminación total de las concentraciones de nitrógeno y azufre.

CAPITULO 3: FUNCIONAMIENTO

3.1 Sistema Bardenpho

El sistema de eliminación biológica Bardenpho, es un proceso que tiene como objetivo la disminución y eliminación de la concentración de compuestos de nitrógeno y fosforo contenidos en el efluente. Este proceso consta con distintas variaciones como "*Bardenpho cuatro etapas*" y "*Bardenpho cinco etapas*", estas distinciones son utilizadas cuando la concentración de compuestos contenidos en el efluente lo amerita necesario.

El comienzo del proceso Bardenpho inicia con el desarrollo de un sistema realizado por Barnard con la misión de remover el nitrógeno del efluente mediante nitrificación y desnitrificación, este objetivo se quería llevar a cabo en cuatro pasos donde solo era, teóricamente, necesaria la acción de un solo tipo de lodo. Barnard pensó que cuatro etapas de tratamiento serían suficientes para remover una cantidad de nitrógeno y fosforo considerable, estas cuatro etapas eran:

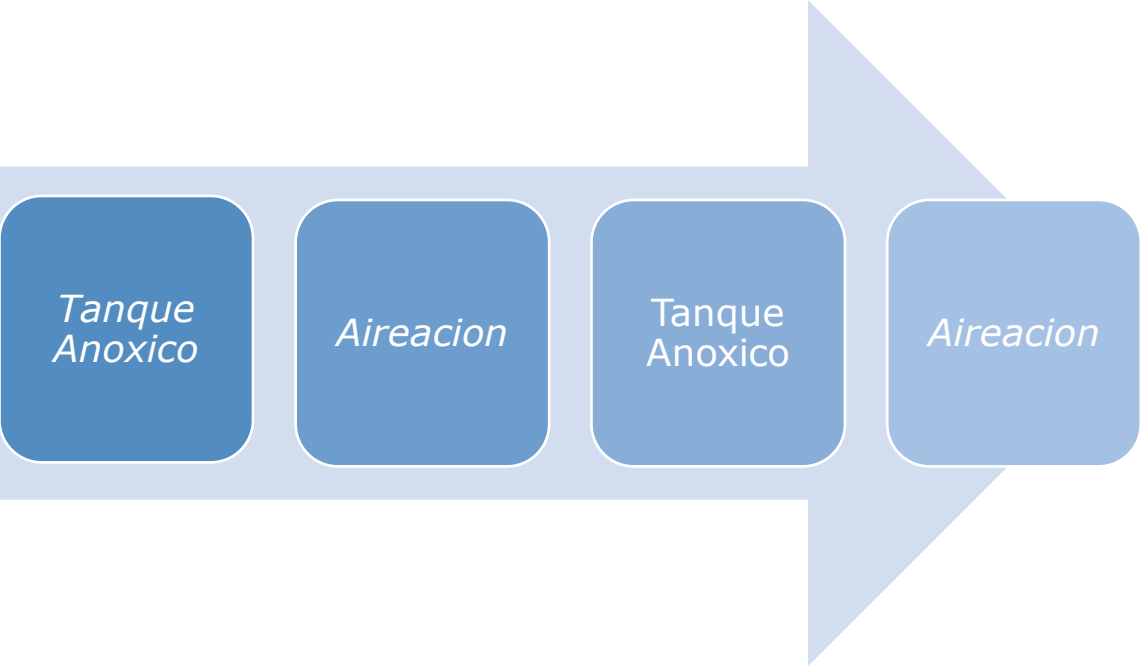


Figura 8: Proceso de Barnard, cuatro etapas.

El proceso desarrollado por Barnard, en un principio, solía poseer una efectividad relativamente media, por lo tanto, el pensó que podría darle una utilidad mayor a este sistema agregando una o dos fases para aprovechar la linealidad del proceso y así eliminar otro compuesto problema del efluente como es el fosforo. Barnard a fin de cuentas, no llevo a cabo estas proposiciones debido a la falta de apoyo y al rechazo que solía generar el lodo para poder tratar fosforo debido a que no tenía la capacidad o la habilidad para consumir, oxidar o reducir P, recordemos que los lodos son el medio en donde se desarrollan las bacterias oxidantes y reductoras que trataran los distintos compuestos problemas.

Con el paso de los años este proceso fue evaluado constantemente con el fin de buscar mejoras para el tratamiento de los efluentes, estas investigaciones desencadenaron una cuantiosa variedad de modificaciones comenzando por dejar de utilizar solo un medio "biorreactor anóxico" y solo un tipo de lodo "lodo anóxico", los reactores de aireación fueron suprimidos teniendo como beneficio una baja en el consumo de energía, se agrego una fase pre - anóxica y post - anóxica donde antiguamente estaban posicionados los tanques de aireación además de incluir una última parte en donde se posiciona un clarificador para darle más transparencia al agua tratada, unido a esta última etapa se encuentra un conducto de vías que re circulan el efluente hacia el reactor pre - anóxico para confirmar y obtener una mejor reducción de los compuestos de nitrógeno. A este tipo de configuración para el proceso desarrollado por Barnard fue catalogado como "*Bardenpho cuatro etapas*".

3.1.1 Impacto del pH en un sistema Bardenpho de cuatro y cinco etapas

El sistema Bardenpho de cuatro etapas, es una conjugación entre un sistema común y corriente de tratamiento de aguas mezclado con el uso de lodos activados que se dispondrán de forma en que su crecimiento sea suspendido. Cuando nos referimos a "crecimiento suspendido" simplemente estamos indicando que el lodo se encontrara esparcido por todo el biorreactor para así poder ejecutar su objetivo sin complicaciones, cuando este lodo llega a cierto punto se realiza una decantación para su re - circulación dentro del propio sistema.

El sistema de cuatro etapas es utilizado netamente para la remoción del nitrógeno en el efluente. Este proceso posee características únicas debido a que presenta un ambiente distinto para todos los bioreactores, además, cabe destacar que es un sistema realmente complicado de construir y darle arranque, sin embargo mantener su funcionamiento no resulta tan dificultoso para los encargados debido a que los factores que influyen mientras se encuentra en funcionamiento resultan ser los mismos que en un sistema de remoción de nitrógeno básico pero destacando la importancia del pH en este caso.

3.1.1.1 Actividad microbiana en los distintos rangos del pH dentro de un biorreactor Bardenpho

El pH, para el sistema Bardenpho de cuatro y cinco etapas, resulta ser mucho más importante que en cualquier otro caso y esto es por las consecuencias que podría traer un desnivel de pH en el efluente y los bioreactores, a que vamos con esto, en el capítulo dos se menciona la importancia de los factores externos e internos pero sin tomar relevancia uno sobre el otro aunque claramente existía una distinción categórica para los variados métodos de desnitrificación, como por ejemplo: Demon, SHARON, Parcial, etc. En el caso de Bardenpho de cuatro etapas el pH es el factor que regula el funcionamiento de cada uno de los bioreactores, a

continuación se hará mención a los efectos que podría conllevar un mal manejo del pH en el sistema, comenzaremos desde el pH 4 debido a que ningún sistema razonable funcionara por bajo de esa cantidad:

Cuando nos encontramos en pH 4 los biorreactores comienzan a generar inhibición que impacta significativamente en el sistema desencadenando que los microorganismos aeróbicos básicos para el tratamiento no cumplan su función, por lo tanto, desarrollaría errores de funcionamiento, problemas en los lodos, en el crecimiento de las bacterias y en la disminución del nitrógeno. Trabajar en un medio de pH 4 tiene más desventajas que lo inverso a esta misma aunque quizás una sola ventaja signifique mucho cuando se tiene problemas con cierto elemento y este es el caso del fosforo. Cuando se tienen demasiados problemas o se presentan muchos obstáculos para poder disminuir las concentraciones de fosforo u oxidarlo se recurre a técnicas como la remoción del fosforo utilizando fierro (Fe^{+3}), el fosforo en presencia de fierro se adherirá formando Fosfuro de Hierro (FeP).

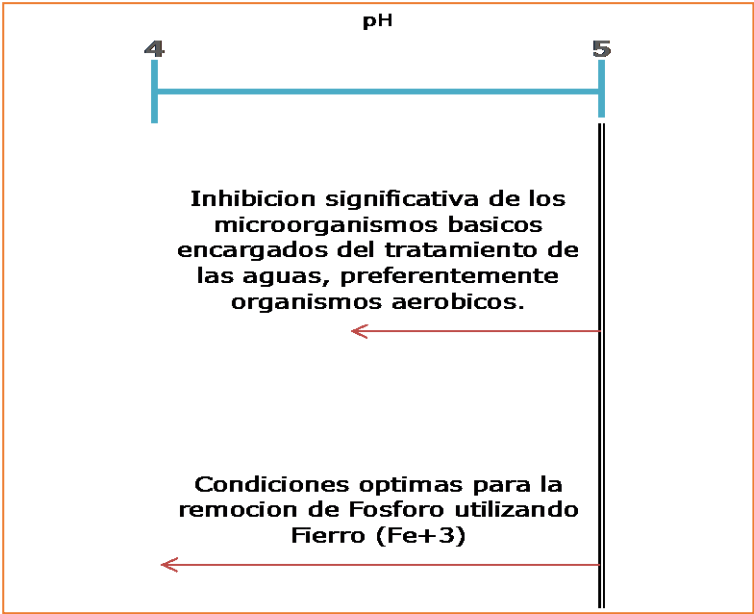


Figura 9: actividad entre pH 4 y pH 5.

Cuando el pH comienza a aumentar pasando de pH 4 a pH 5, se presenta una inhibición considerable de microorganismos nitrificantes desactivando el sistema de remoción de nitrógeno por completo. A este pH, la remoción del fósforo presenta nuevamente una ventaja y esto es debido a que se puede emplear una fuente de aluminio (Al^{+3}), al igual que en el caso anterior donde se utilizaba hierro (Fe^{+3}) pero aquí solo se cambia la fuente, para que se una con las moléculas de fósforo contenidas en el efluente formando fosfato de aluminio, esta técnica no es utilizada recurrentemente hasta se podría decir que solo es un método teórico y obsoleto debido a que la unión del fósforo con el aluminio forma como sub producto fosfina, la fosfina es un gas extremadamente peligroso para los humanos que reacciona con la humedad del ambiente. Como ya hemos visto, el pH bajo es el ambiente más considerado y preferido cuando se trata de remover fósforo ya que los ácidos grasos volátiles y organismos tienen una mayor habilidad y efectividad en este caso, a esto último se le denomina remoción de fósforo mejorada y ocurre cuando el pH se halla en 5,5.

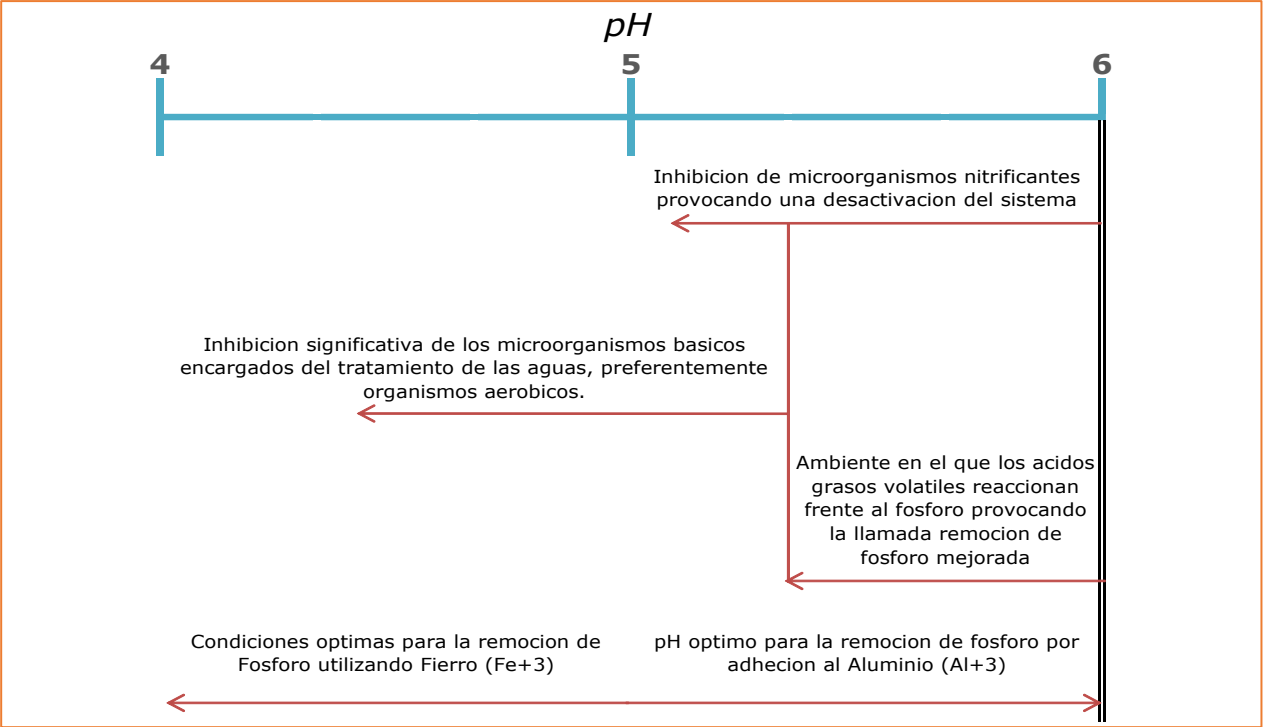


Figura 10: actividad entre pH 4, pH 5 y pH 6.

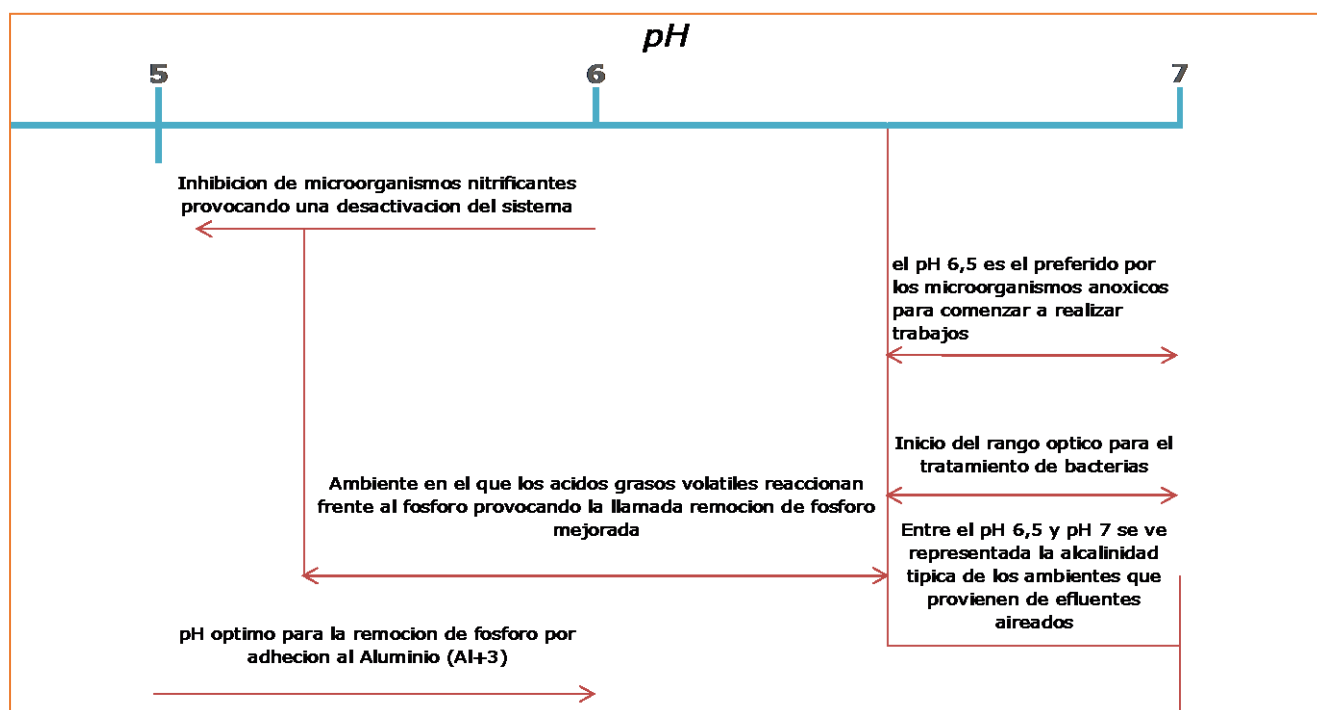


Figura 11: actividad entre pH 5, pH 6 y pH 7

En pH 6 no existen muchas reacciones en comparación con los dos casos anteriores de pH 4 y pH 5, lo que sí, el pH 6 dictamina los primeros límites para algunos casos como el pH en donde los microorganismos anóxicos pueden llegar a trabajar y cumplir sus funciones sin algún problema, es más, este pH es el preferido por estas bacterias para realizar los trabajos correspondientes. El pH 6,5 es el inicio del rango óptico para el tratamiento con microorganismos aeróbicos, el pH entre 6,5 y 7 representa la alcalinidad típica de los ambientes que provienen de efluentes con lodos activados aireados.

Cuando la alcalinidad del medio ha aumentado lo suficiente para ser ubicado en pH 7, se comienzan a ver las primeras ventajas y esto es debido a que entre pH 7 y pH 8 se encuentra el equilibrio para que las bacterias nitrificantes realicen sus tareas de manera mucho más óptima y excepcional, cuando se llega a esta alcalinidad los microorganismos exhiben un tiempo de adaptación mucho más alto pero que termina siendo suavizado con los resultados que presentan al momento de tratar efluentes con altas concentraciones de nitrógeno, los expertos en este tema preferentemente trabajan entre los pH 7,5 y pH 8, aunque estar dentro de pH 7 o simplemente pH 7 sigue siendo un ambiente óptimo para el trabajo. El fósforo sigue estando presente hasta en estas condiciones y es que la remoción de este mismo elemento puede ser llevada a cabo adhiriendo calcio (Ca^{+2}) al efluente provocando la unión del fósforo a este suministro agregado formando fosfato de calcio que puede ser eliminado de manera mucho más fácil, existen casos donde el suministro de calcio no resulta necesario debido a la dureza presentada por estas aguas.

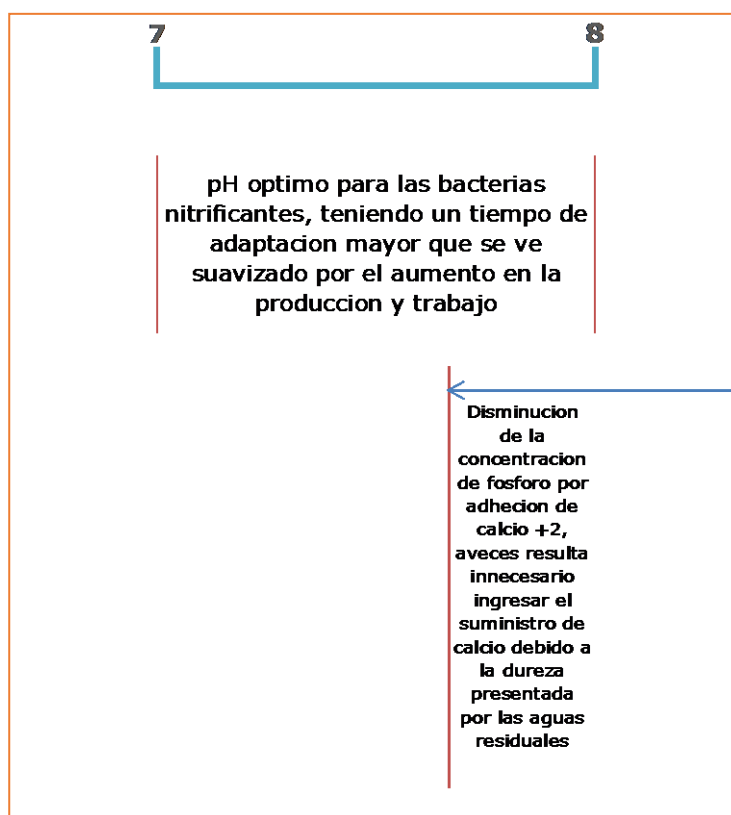


Figura 12: actividad entre pH 7 y pH 8.

Cuando los compuestos y elementos que aumentan la basicidad del agua hacen posible el aumento de pH 7 a pH 8 se registra el primer equilibrio del medio interno con el medio externo, esta armonía es presentada por el CO_2 generado por el efluente con el CO_2 existente en el medio ambiente. De igual manera que sucedía en pH 4, pero en este caso a pH 8,5, se exhibe una inhibición en el crecimiento de las bacterias nitrificantes pero un aumento en el desarrollo de las bacterias desnitrificantes, esto es debido a que los microorganismos nitrificantes y desnitrificantes necesitan ambientes ácidos y por otra parte básicos, la diferencia en los ambientes es quien les ayuda a realizar mejor las oxidaciones y reducciones. Quizás resulte ciertamente confuso el hecho de que los microorganismos nitrificantes y desnitrificantes trabajen entre un pH 7,5 y 8 siendo que presentan habilidades distintas las cuales mejoran su trabajo cuando se hallan respectivamente en pH más bajos y más altos, como por ejemplo: las bacterias nitrificantes se emplean de mejor manera cuando están en presencia de pH 6 y las bacterias desnitrificantes están mucho mejor en los casos de pH 8 o sobre este mismo aunque como limite se tendría pH 10.

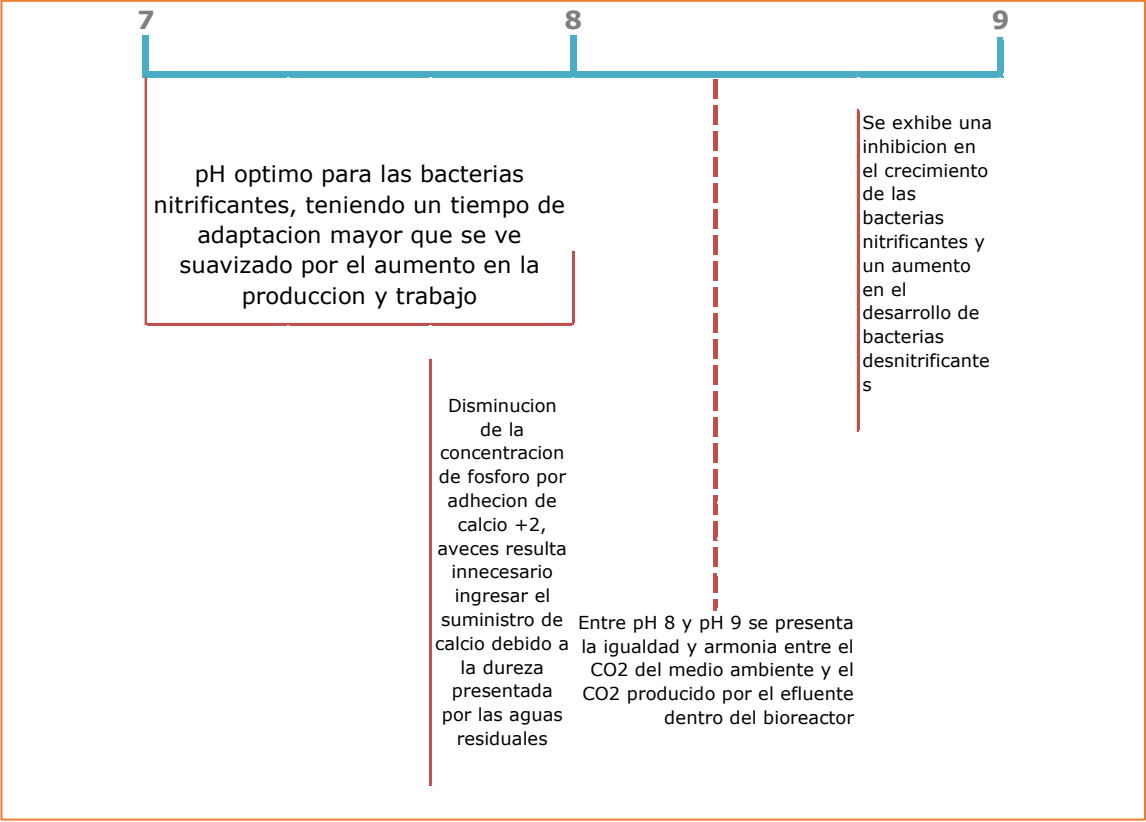


Figura 13: actividad entre pH 7, pH 8 y pH 9.

Al llegar a pH 9 la presencia y existencia de los microorganismos nitrificantes u oxidantes de amonio se ve gravemente afectada haciendo que su desarrollo y trabajo oxidativo sea totalmente inhibido, las complicaciones que se presentaran a este pH como obstáculo para el crecimiento bacteriano nitrificante desencadenaran la desaparición total de los microorganismos que se relacionen con el amoniaco. En el caso de los microorganismos desnitrificantes que reducen los compuestos de nitrato y nitrito se ven favorecidas, por lo tanto, presentan una mayor producción y una mejoría en su trabajo.

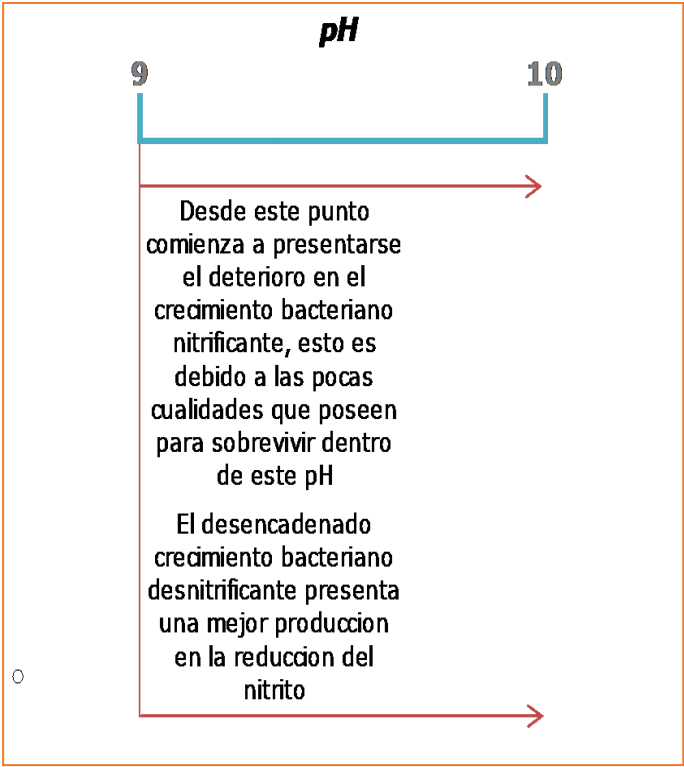


Figura 14: actividad entre pH 9 y pH 10.

En los casos donde el pH se ubica en un rango de 10 o más, preferentemente, es utilizado para tratar nitrógeno debido a que la presencia de fosforo disuelto o en forma de compuestos es totalmente nula. Desde el pH 8 u 8,5 se comienzan a repetir las mismas ventajas en el medio, por lo tanto, dar importancia a lo que suceda después de pH 10 no es del todo importante si tenemos en cuenta que se verán los mismos síntomas en el efluente y en el medio.

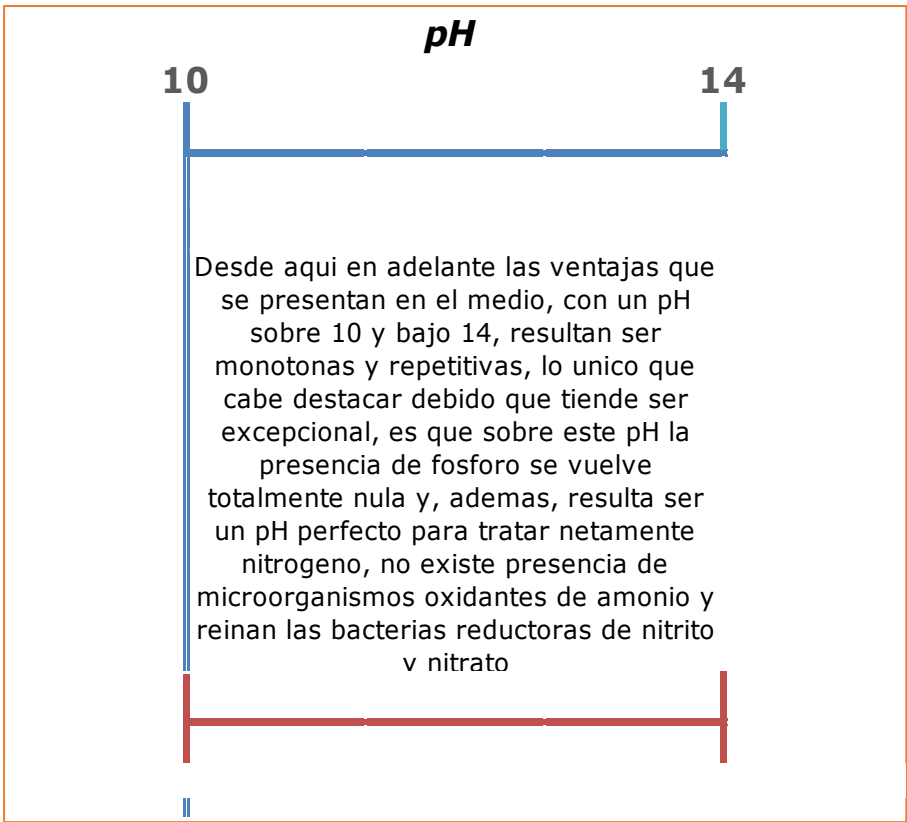


Figura 15: actividad entre pH 10 y pH 14.

3.2 Bardenpho de cuatro etapas.

El diagrama de flujo que se exhibirá a continuación representa un resumen de lo que es y consta el sistema Bardenpho:

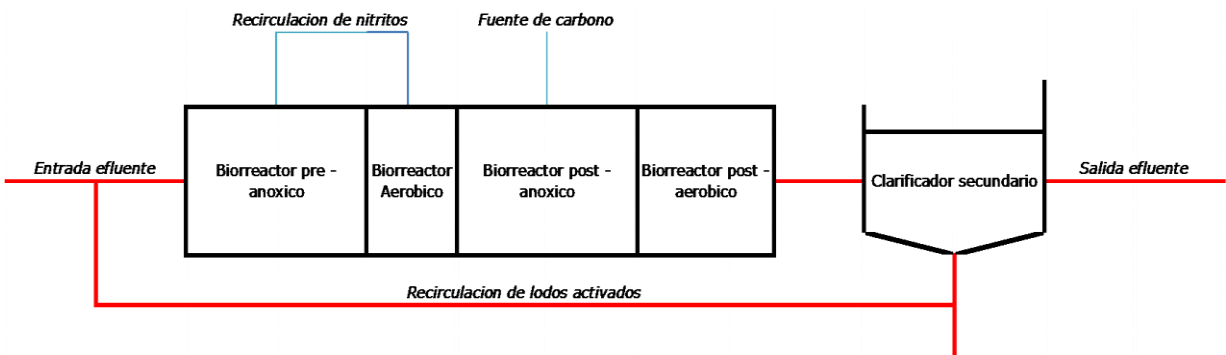


Figura 16: Diagrama de flujo, sistema Bardenpho de cuatro etapas.

La configuración Bardenpho de cuatro etapas es un proceso de crecimiento continuo con la alternancia entre biorreactores de medios anoxicos, aeróbicos, anoxicos y aeróbicos. El principal objetivo de que exista esta alternancia y variación entre distintos ambientes es netamente la eliminación completa del nitrógeno, la idea es que se disminuya lo máximo posible la concentración del nitrógeno en el efluente para así estar al margen de la ley y poder verter sin causar daños al medio ambiente.

3.2.1 Inicio del tratamiento

3.2.1.1 Biorreactor uno: pre – anóxico

Cuando el efluente llega lo suficientemente cerca a los biorreactores del proceso Bardenpho, se inicia la primera parte de este sistema y es el ingreso del efluente al biorreactor pre – anóxico.

Al momento en que el efluente con aguas residuales sin tratar ingresa al sistema automáticamente se mezcla con el licor que proviene del biorreactor aeróbico, la idea de que este suministro proveniente del biorreactor dos sea mezclado con el efluente que se halla en el biorreactor uno es para que sirva y funcione como combustible y alimento para los microorganismos que se encuentran en el biorreactor uno, cabe mencionar que las aguas residuales contenidas en el biorreactor pre – anóxico contienen una baja concentración de oxígeno que puede ser hasta nulo, por lo tanto, las bacterias se alimentan del oxígeno que se halla adherido a los compuestos como nitrato, nitrito y amonio.

Con estas dos acciones consecutivas:

- 1) La mezcla de licor y el efluente.
- 2) Consumo del oxígeno adherido a los nitratos y nitritos que se hallan en el licor.

Se reducen dos tercios del nitrógeno contenido en el agua residual, los compuestos nitrogenados que son reducidos a nitrógeno gaseoso en esa fase, son netamente compuestos que desde antes ya venían en esa forma, por lo tanto, solo es una pequeña parte la cual es liberada al medio ambiente al ser conducida por una leve aireación de 1 hasta 2 horas que ocurrirá en el biorreactor dos. Los tiempos de aireación regularmente suelen ser de hasta 8 horas, por lo tanto, que sea una aireación de 2 horas resulta ser muy corta en comparación a las que se realizan consecutivamente.

3.2.1.2 Biorreactor dos

Cuando las actividades del biorreactor uno han concluido el efluente sigue una corriente artificial impulsada por bombas que van desde inicio a fin que, para este caso, impulsaran el agua residual para que se desplace desde el biorreactor pre – anóxico a el biorreactor aeróbico.

Cuando el efluente ya ha llegado al biorreactor dos y se encuentra instalado, comienzan a realizarse las primeras actividades microbianas comenzando por la oxidación de las moléculas de amonio, la degradación de la materia orgánica presente además de la transformación de esta misma en CO₂. El amonio que se ha oxidado a nitrato o que se ha quedado en el camino en forma de nitrito se separa siguiendo una de las dos vías disponible, la vía 1 es la recirculación de este llamado licor que contiene una gran concentración de nitratos y nitritos, la vía 2 es seguir el transcurso hacia el tercer reactor de post – anoxia. A continuación vamos a presentar las ventajas de seguir la vía uno o irse por la vía dos.

Tabla 12: Ventajas respectivas entre vía uno y vía dos

Vía uno	Vía dos
Efluente más desnitrificado al momento de llegar al biorreactor tres.	Una mayor concentración de compuestos nitrogenados significa mayor cantidad de oxígeno para las bacterias del reactor tres.
Aguas mas admisibles para su respectiva descargas	No se acumula fosforo por exceso en el ingreso de compuestos fosforados
Las aguas que son re circuladas por la vía uno necesitan menos acción del clarificador para volverlas menos turbias.	Seguir la vía dos da disposición para seguir tratando aguas residuales constantemente.

Cuando el agua residual se ha ido por una de las dos vías podemos pasar a explicar la siguiente etapa que vendría ser en el biorreactor tres. Cabe destacar que

en esta parte del sistema se integra, lo mencionado anteriormente, los tiempos de retención hidráulica o más bien llamados aireación, al exhibir el efluente a una aireación leve eliminamos el nitrógeno gaseoso.

3.2.1.3 Biorreactor tres: post – anóxico

Cuando sucede el cambio entre el biorreactor dos hacia el biorreactor tres, el efluente procedente del biorreactor aeróbico contiene oxígeno disuelto en su concentración, por lo tanto, este suministro es consumido inmediatamente en cuando ingresa al biorreactor post – anóxico. A esta fase se incorporan nitritos, nitratos, amonio, oxígeno disuelto y otra variedad de compuestos que no son tratados precisamente en esta parte, cada uno de estos suministros tiene su razón por la cual llega y se integra al biorreactor tres.

Comenzando por el NH_4^+ , cuando el efluente ingresa desde el primer biorreactor hacia el segundo ocurrió que las bacterias no lograron oxidar del todo este compuesto ya sea por falta de suministro, el pH del medio no era correcto para ellas, existía un crecimiento de otro tipo de bacterias que imposibilitaba el trabajo, etc. Por lo tanto, parte del amonio residual que no se oxidó termina llegando al tercer biorreactor donde debe esperar hasta llegar a la última fase que vendría siendo el cuarto biorreactor para lograr ser oxidado en NO_2^- o NO_3^- . Para el caso de los nitratos y nitritos existen dos razones del por qué lograron llegar hasta el biorreactor tres manteniendo su composición:

- El reactor dos tenía como objetivo oxidar el amonio a nitratos o nitritos, por lo tanto, parte de la concentración de nitratos hallada en el reactor tres es simplemente porque es procedente de un proceso anterior.
- La segunda por lo cual existe una concentración de nitratos distinta a la dada en la razón anterior es netamente porque parte del nitrato procedente del primer biorreactor sufrió una acumulación sistemática que terminó fluyendo contenida en el efluente.

En el caso del oxígeno disuelto que ingresa a la tercera etapa tiene que ver con el consumo bacteriano, cuando existe una gran cantidad de oxígeno disuelto a veces no suele ser consumido así que solo sigue la corriente del efluente.

Al saber las razones de porque el efluente llega con tal concentración de compuestos podemos pasar a explicar las actividades llevadas a cabo por los microorganismos, para no perdernos volvemos a recordar que nos encontramos en la tercera etapa del proceso Bardenpho que vendría siendo el tercer biorreactor post – anóxico.

La fase post – anóxica funciona como segundo biorreactor de estados anóxicos, el objetivo principal de esta implementación busca disminuir lo máximo

posible las concentraciones de nitrógenos que aún quedan sobrantes en el efluente. Como sucedió en el caso del biorreactor uno o pre – anóxico, el nitrato y el nitrito son transformados en nitrógeno gaseoso por medio del uso de sus oxígenos que son arrancados de la estructura para facilitar el proceso y funcionamiento bacteriano. Para los demás compuestos no existe influencia del biorreactor tres en sus estructuras como por ejemplo el amonio ni tampoco existe una recirculación para poder llevar los nitratos que no fueron desnitrificados.

3.2.1.4 Biorreactor cuatro

El sistema Bardenpho tiene características muy típicas que lo hacen un proceso fiable como la monotonía del sistema en los biorreactores, esto va dirigido netamente a que la actividad y acción microbiana funciona de igual manera en el biorreactor uno, tres como en el biorreactor dos y cuatro asegurado una gran disminución en la concentración de compuestos que son dañinos al ser vertidos al medio ambiente, otra de sus cualidades es la versatilidad para la eliminación del fosforo lo cual se explicara después de haber repasado los trabajos en el biorreactor cuatro.

En el caso del biorreactor cuatro que es de fase aeróbica, o sea que tiene presencia de oxígeno disuelto además de recibir oxígeno directamente del medio ambiente por parte de la aireación, son oxidados mediante nitrificación los últimos compuestos nitrogenados para obtener nitritos y nitratos, el nitrógeno gaseoso es devuelto al medio ambiente y se cumple la armonía entre el CO₂ del biorreactor y el CO₂ del medio ambiente. Los compuestos de nitrito y nitrato que no lograron llegar a la desnitrificación (cabe recordar que en los procesos anóxicos se emplea este método microbiano) deben pasar al clarificador donde suelen ser recirculados junto con los lodos para ser dirigidos al primer biorreactor.

3.2.1.5 Biorreactor cinco para eliminación de fosforo

Con anterioridad hicimos referencia a que el proceso Bardenpho poseía dos variaciones que son Bardenpho cuatro etapas y cinco etapas, entre estas dos alternativas existe un mismo concepto para los primeros cuatro biorreactores siendo la única distinción el insertar un biorreactor mas para los casos en donde el objetivo sea la eliminación del fosforo y del nitrógeno simultáneamente. Cuando el fosforo residual pasa por los distintos biorreactores sin sufrir alteración alguna se acumula hasta llegar a la fase donde será liberado, cuando esto sucede las bacterias consumidoras de fosforo se harán de todas las moléculas de este elemento o compuestos fosforados, la acumulación del fosforo es importante para su futura liberación total y para esto se deben respetar las condiciones ambientales aeróbicas para que el fosforo no se descompense y libere en un biorreactor incorrecto. En esta última fase existe una re – aireación que se utiliza para confirmar la eliminación

total del nitrógeno gaseoso en el efluente además de otros compuestos nocivos que están en forma de gases.

3.2.2 Control de proceso

El sistema de remoción biológica del nitrógeno y fosforo Bardenpho es totalmente dependiente de los distintos controles que se deban aplicar a esta configuración para su respectivo funcionamiento y debido mantenimiento. Los parámetros aplicados que se deben de cuidar y respetar son por ejemplo los tiempos de retención celular, la tasa de recirculación de lodos activados (*RAS*), las concentraciones de los SST en el licor que re circula del biorreactor dos al biorreactor uno (*LSS*), la proporción que existe entre el consumo de los microorganismos y la cantidad de alimento que se les administra y el OD por miligramo de nitrógeno oxidado o nitrato, a continuación en el siguiente cuadro se exhibirá la información más detallada para cada uno de los parámetros.

Tabla 13: Parámetros a controlar para el funcionamiento del sistema Bardenpho:

Parámetro de diseño	Unidad de medida	Sistema Bardenpho 4 etapas
Tiempo de retención celular	días	7 – 30 días
Tasa de recirculación de lodos activados	% del efluente	50% a 100%
Concentración de SST en licor	mg/L	2000 – 4000 mg/L
Proporción consumo y alimento	Kg DBO/Kg MLVSS*d	0.453 - 0.907 Kg DBO/kg MLVSS*d
OD por mg de Nitrógeno	mg de OD* mg de Nitrógeno	4,6 mg de OD * 1 mg de Nitrógeno
Mg de alcalinidad consumido por mg de Nitrógeno oxidado	mg de CaCO ₃ consumidos por mg de N oxidado	7,2 mg de CaCO ₃ * mg de N oxidado

Cuando una de estas características recibe una alteración ya sea pequeña o grande desencadena consecuencias totalmente graves para el funcionamiento de sistema, esta dependencia a mantener los parámetros dentro de rangos aceptables hace que el proceso tenga poca adaptabilidad a trabajar fuera de su “zona de trabajo optima” o “zona de confort”, por lo tanto, el sistema Bardenpho es poco recomendable para plantas de tratamiento de residuos industriales o tratamientos de agua donde no exista un cuidado de especialistas o preocupación por los factores que puedan afectar al proceso.

3.3 Conclusiones

El sistema de eliminación biológica del nitrógeno Bardenpho posee un gran prestigio a nivel mundial y eso es gracias a los resultados que se ven reflejados en el proceso mismo, el hacer que las concentraciones de nitrógeno y fosforo disminuyan considerablemente lo hace muy superior si se compara con la gran variedad de sistemas de nitrificación/desnitrificación que existen, por lo tanto, existen casos donde este método para el tratamiento de aguas es el preferido.

La dependencia que existe entre las condiciones de trabajo y el funcionamiento del sistema resulta un arma de doble filo donde las desventajas se ven superiores a las ventajas, como el sistema Bardenpho necesita un cuidado minucioso y expertos especializados para controlar cada uno de los parámetros lo vuelve un proceso sumamente delicado que bajo condiciones toscas no serviría y solo presentaría dificultades, existen sistemas que pueden seguir funcionando aunque se encuentren en las peores condiciones medio ambientales (condiciones externas) donde las temperaturas sean muy altas o muy bajas, en cambio Bardenpho en temperaturas muy altas se averiaría o en temperaturas muy bajas se inhibiría por completo.

La preocupación por el tratamiento de las aguas residuales que llegan a parar a cuerpos fluviales es un tema de contingencia internacional debido a que la contaminación está superando todos los paradigmas admisibles lo que esta desencadenando problemas de salud en algunos países del mundo donde no existe agua limpia para consumir, aunque esto no es netamente culpa del no tratamiento de las aguas si no que también es culpa de los pocos decretos y leyes que protegen la flora y fauna y se encargan de limitar las concentraciones de los compuestos contaminantes, el decreto supremo n°90 que se abordó como tema en este trabajo de título limita muy débilmente compuestos tan contaminantes como lo es el cianuro, el aluminio o el mercurio, puede que sean concentraciones muy bajas pero esto no se deberían permitir debido a que de igual manera genera una contaminación. La no creación y promulgación de leyes en defensa del medio ambiente está generando una crisis medio ambiental sin retorno.

El sistema Bardenpho y todos los sistemas de nitrificación y desnitrificación tienen un gran objetivo en común y es la disminución de fuentes contaminantes en las aguas residuales, cada proceso resulta predominante en distintos aspectos de esta área de trabajo ya sea en el desarrollo bacteriano, condiciones de trabajo, etc. Por lo tanto la existencia de tantas opciones resulta beneficiosa para el mundo. Si nos cerráramos en un solo sistema de eliminación biológica del nitrógeno tendríamos la necesidad de formar comisiones de trabajo encargadas netamente en el avance y el desarrollo de este único sistema, esto no sería algo desventajoso al contrario sería algo provechoso que se debe tomar como idea a pesar de que exista una multitudinaria cantidad de opciones en el mercado.

3.4 Bibliografía

- 1) CARRERA MUYO, JUAN, 2001, *Eliminación biológica de nitrógeno en un efluente con alta carga. Estudio de los parámetros del proceso y diseño de una depuradora industrial*. Doctorado. Universitat Autònoma de Barcelona.
- 2) CASTILLO BRAVO, DIEGO FERNANDO ALEXIS, 2017, *DESNITRIFICACIÓN AUTÓTROFA HETERÓTROFA SIMULTÁNEA DE RIL SINTÉTICO EN FILTRO ANAEROBIO (LECHO FIJO) CON FLUJO ASCENDENTE*. Ingeniero civil. Universidad Técnica Federico Santa María.
- 3) CERVANTES-CARRILLO, FRANCISCO, PÉREZ, JAIME and GÓMEZ, JORGE, 2000, Avances en la Eliminación Biológica del Nitrógeno de las Aguas Residuales. *Revista Latinoamericana de Microbiología*. 2000. No. 2, p. 73 - 79.
- 4) CLAROS BEDOYA, JAVIER ALFONSO, 2012, *ESTUDIO DEL PROCESO DE NITRIFICACIÓN Y DESNITRIFICACIÓN VÍA NITRITO PARA EL TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE CORRIENTES DE AGUA RESIDUAL CON ALTA CARGA DE NITRÓGENO AMONIAICAL*. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de València.
- 5) FERRER POLO, JOSÉ and SECO TORRECILLAS, AURORA, 2007, *Tratamientos biológicos de las aguas residuales*. 1. Valencia: Editorial UPV.
- 6) GARCÍA-RUIZ, MARIA JESUS, 2018, *Desarrollo de una Nueva Tecnología de Eliminación de Nitrógeno basada en Procesos de Nitrificación Parcial-Anammox mediante Biofiltración en Lecho Fijo*. Tesis doctoral. Universidad de Granada.
- 7) KUENEN, J.G, 2008, Anammox bacteria: from discovery to application. *Nature Reviews Microbiology*. 2008. Vol. 6, no. 4, p. 320-326.
- 8) LLORET PARD, JAIME, 2015, *ESTUDIO DE ALTERNATIVAS PARA LA AMPLIACIÓN DE LA DEPURADORA DE AGUAS RESIDUALES ALZIRA-CARCAIXENT MEDIANTE SIMULACIÓN CON SOFTWARE DESASS*. Master. Universitat Politècnica de València.
- 9) RAMALHO, R.S, 2003, *Tratamiento de aguas residuales*. 1. Barcelona: Reverté.
- 10) RUSSELL, DAVIS L and BONET RUIZ, JORDI, 2012, *Tratamiento de aguas residuales*. 1. Barcelona: Reverté.

- 11) Sanabria, Janeth., Bedoya, Leidy., Sánchez, Jaime., PROCESO ANAMMOX UNA APLICACIÓN EN INGENIERÍA: REVISIÓN GENERAL DE LOS ASPECTOS MICROBIANOS. Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente [en línea]. 2009, Disponible en:
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=231116390010>
- 12) TUSET, SERGIO, 2019, nitrificación | Tratamiento de aguas residuales. *Ingeniería ambiental para el sector industrial*. 2019. Disponible en: <https://blog.condorchem.com/tag/nitrificacion/>

3.5 Anexo

GLOSARIO

DBO: Demanda Bioquímica de Oxígeno, es la cantidad de oxígeno que consumen los microorganismos para degradar la materia orgánica presente en una muestra.

DQO: demanda Química de oxígeno, es la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar la materia orgánica por métodos químicos y transformarla en moléculas como dióxido de carbono o agua.

Bulking: Es el problema que se presente en las plantas de tratamientos donde los fangos activados presentan problemas para decantar o para sedimentar.

Nitrosomas: Son un género de bacterias que tienen por función oxidar las moléculas de amoníaco a nitrato, la oxidación de estos compuestos es parte de un proceso metabólico propio de los microorganismos pertenecientes a este tipo.

Nitrosomas europaea: Especie de microorganismos con la habilidad o capacidad de poder degradar algunos compuestos de tipo halógenos, como por ejemplo: tricloroetileno, benceno y cloruros de vinilo. Originariamente este tipo de bacterias degradantes se encuentran en ambientes ricos en minerales y nutrientes orgánicos. Son participes en la oxidación del amonio u amoníaco, además, de participar en la limitación de la fijación del dióxido de carbono (CO₂).

Nitrosomas eutropha: Al igual que las *Nitrosomas europaea*, las *Nitrosomas eutropha* se hallan en el mismo medio, son tolerantes a las altas concentraciones de amonio, pueden crecer y desarrollarse de manera anaeróbica

Nitrobacters: Microorganismos con la habilidad de consumir el nitrito como combustible para así reducirlo a moléculas cada vez más simples como resulta ser el nitrato que sigue una fase de reducciones para terminar siendo nitrógeno gaseoso.

Pseudomonas: Bacterias gram negativas, encargadas de la descomposición de los compuestos orgánicos pertenecientes al medio ambiente, poseen poca especificidad, por lo tanto, pueden atacar a los humanos.

Micrococcus: Género bacteriano, gram positivo, de forma esférica con un tamaño entre 0,5 a 3 micrómetros, se hallan en el suelo y en los alimentos, son aeróbicas, no poseen propiedades patógenas, en la industria se utilizan para transformar moléculas complejas a simples.

Achromobacter: Grupo de bacterias desnitrificantes, que se hallan en el medio ambiente, alimentos y tracto digestivo del cuerpo humano, de tipo gram negativo, una de las funciones es la reducción del nitrato.

Bacillus: Género bacteriano, gram positivo, encargados de formar esporas de estructuras muy resistentes en ambientes extremos, al igual que los géneros

Achromobacter, son encargadas de la degradación y oxidación de compuestos nitrogenados.

Aguas residuales industriales: aguas que se encuentran contaminadas por una alta concentración de sustancias orgánicas, residuos de origen industrial o compuestos tóxicos para la vida y el medio ambiente.

Aguas residuales municipales: aguas residuales que se encuentran contaminadas con altas concentraciones de sustancias orgánicas debido a que estas netamente provienen de desechos salidos del cuerpo humano como urea, feca, sangre, etc.

Imina: Las iminas/iminos son grupos funcionales con una estructura $RR'C=NR''$, donde los elementos R pueden ser hidrógenos o posibles grupos orgánicos. Estas son resultados de la concentración del amoníaco o un grupo de aminas primarias en conjunto con una cetona o un aldehído.

Fuente de energía primaria: se denomina a la energía proveniente de la naturaleza, como las fuentes de energía renovables siendo la energía eólica, solar, hidráulica o la biomasa las principales y las fuentes de energía no renovables como el petróleo, carbón, uranio, o gas. En pocas palabras son las energías las cuales no han sido sometidas a ningún tipo de cambio o alteración.

Quimiolitotrofia: Es una rama de organismos los cuales tienen la habilidad de generar energía mediante la metabolización de moléculas de tipo inorgánica como lo son el azufre y el hierro, además de convertir el amoníaco en nitrato.

Termotolerantes: Es un genero proveniente de los coliformes normales, las características de los coliformes termotolerantes es la habilidad de poder fermentar la lactosa a una temperatura mayor (44.5°C) que los coliformes convencionales (35°C).

Atropica: Se le denomina atropica a todo lo que tenga que ver con los seres humanos y con la posición de ellos en el ámbito natural, el principal objetivo de este término es englobar todos los cambios que sufre la naturaleza por acción de los seres humanos.

NMP: Numero más probable, es una unidad de medida para la determinación de coliformes en el agua residual.

Hab/día: unidad de medida utilizada para calcular la cantidad de sólidos suspendidos vertida, se define como cantidad de habitantes que desechan residuos de sólidos suspendidos por día.

Actividades antropogenicas: Se le llama a los efectos, procesos o materiales que se dan gracias a los procesos de la actividad humana. Se utiliza para diferenciarlas de las actividades que se dan de manera natural y para describir causas de contaminación ambiental como productos biológicos o desechos químicos, como por

ejemplo: la emanación indiscriminada de gases de efecto invernadero y dióxido de carbono. Generalmente las actividades antropogénicas son la industria en sí, minería, agricultura, construcción, urbanización y deforestación.

Metahemoglobina o síndrome del bebe azul: Es un trastorno sanguíneo, la metahemoglobina trata de la sobreproducción de esta misma proteína la cual se encarga de transportar oxígeno a las distintas partes del cuerpo al igual que su hermana predecesora hemoglobina, la única diferencia, es que la metahemoglobina cuando sufre un trastorno como este es incapaz de liberar el oxígeno que transporta al cuerpo, por lo tanto, el organismo comienza a quedarse sin oxígeno provocando distintos síntomas y problemas como el trastorno de crecimiento, discapacidad intelectual y coloración azulada en la piel.

Biogeoquímicos: es la relación, conexión y movimientos que existen entre los elementos vivos y los muertos, con el objetivo de hacer que la energía, elementos o sustancias químicas que se generan, al momento de perecer un organismo, fluya por medio de los distintos ecosistemas presentes. Los ciclos biogeoquímicos más importantes son los ciclos hidrológicos, nitrógeno, carbono, azufre, oxígeno y el ciclo biogeoquímico del fósforo.

Bacterias simbióticas: Son las células, bacterias o seres que se asocian de otros organismos con el cual realizan intercambios en las funciones necesarias para poder solventar la vida, esta dependencia es bilateral, por lo tanto, tanto una parte como la otra necesitan de sí mismos para poder sobrevivir creando así un sistema de codependencia.

Zona aeróbica: Lugar donde es necesario el oxígeno para que exista una acción o proceso, las zonas aeróbicas son importantes al momento de realizarse la nitrificación.

Zona anaeróbica: Son distritos donde existe poca presencia o concentración de oxígeno, estas zonas son de suma importancia en la desnitrificación para que las bacterias se alimenten de los compuestos nitrogenados producidos en la nitrificación.

Cuerpos fluviales: es un concepto general que se utiliza para englobar todos los terrenos en donde fluya agua, en este caso, naturalmente se utiliza para los ríos y lagos.

AOB y NOB: bacterias oxidantes de amonio y bacterias oxidantes de nitritos.

Hidroxilamina: Se origina en la sustitución del átomo de hidrógeno, que se encuentra enlazado en el átomo de amoníaco, por un grupo hidroxilo. Es un compuesto que no se halla libre en el medio ambiente o en la naturaleza misma, tiene características como ser un cuerpo sólido, es incoloro e inodoro.

Hidracina: Compuesto químico formado por cuatro átomos de hidrogeno y dos átomos de nitrógeno, en la industria química se emplea como combustible de cohetes.

Cultivo de Batch: Método biotecnológico de producción y crecimiento en el cual se administra un sustrato limitado a una cepa bacteriana dentro de un recipiente.