



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria
y Recursos Hidráulicos (ERIS)

EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DE NITRATOS EN SOLUCIÓN ACUOSA POR BENTONITA MODIFICADA

Ing. Edwin Josué Espina Sandoval

Asesorado por el MSc. Ing. Zenón Much Santos

Guatemala, noviembre de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DE NITRATOS EN
SOLUCIÓN ACUOSA POR BENTONITA MODIFICADA**

ESTUDIO ESPECIAL

PRESENTADO A LA ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA
Y RECURSOS HIDRÁULICOS (ERIS)

POR

ING. EDWIN JOSUE ESPINA SANDOVAL

ASESORADO POR EL MSc. ING. ZENÓN MUCH SANTOS

COMO REQUISITO PREVIO PARA OPTAR AL GRADO ACADÉMICO
DE:

**MAESTRO (*MAGISTER SCIENTIFICAE*) EN CIENCIAS
DE INGENIERÍA SANITARIA**

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**DIRECTOR DE LA ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y
RECURSOS HIDRÁULICOS -ERIS-**

MSc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

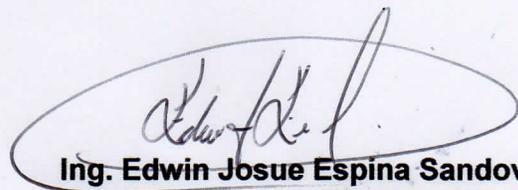
EXAMINADOR	MSc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis
EXAMINADOR	MSc. Ing. Félix Alan Douglas Aguilar Carrera
EXAMINADOR	MSc. Ing. Zenón Much Santos

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración el trabajo de investigación titulado:

EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DE NITRATOS EN SOLUCIÓN ACUOSA POR BENTONITA MODIFICADA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS), con fecha 07 de mayo de 2013.



Ing. Edwin Josue Espina Sandoval
tzespina@gmail.com
Carné No. 100023567



UNIVERSIDAD DE
SAN CARLOS
DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERIA



FACULTAD DE INGENIERIA
Escuela Regional de Ingeniería
Sanitaria y Recursos Hídricos



ESCUELA REGIONAL DE INGENIERIA SANITARIA
Y RECURSOS HIDRAULICOS - ERIS -
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA - USAC -

Edificio de ERIS,
Instalaciones de Prefabricados, CII
Ciudad universitaria Zona 12
Ciudad de Guatemala 01012
Guatemala, C.A.

Tel. (502) 24188000,
Ext.86212 y 86213
(502) 24189138
(502) 24189140

Telfax (502) 24189124

www.ingenieria-usac.edu.gt

Guatemala, noviembre 24 de 2014

M. Sc. Ing. Adán Pocasangre
Coordinador de la Maestría en Ingeniería Sanitaria
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos
Hidráulicos "ERIS"
Facultad de Ingeniería, USAC

Respetuosamente me dirijo a usted, informándole por
medio de la presente que he revisado el documento
titulado:

**"Evaluación de la Remoción de Nitratos en Solución
Acuosa por Bentonita Modificada".**

Elaborado por el Ingeniero Edwin Josué Espina Sandoval,
como parte de su Estudio Especial II y como requisito para
optar al grado académico de Maestro en Ingeniería
Sanitaria, mediante la presente me permito informarle mi
satisfacción con su contenido y por lo tanto, le comunico
que dicho documento cuenta con mi aprobación.

Agradeciendo la atención prestada a la presente, me
suscribo de usted,

Atentamente.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS".

M. Sc. Ing. Zenón María Sandoval
Asesor del estudio



Escuelas: Ingeniería civil, Ingeniería Mecánica Industrial, Ingeniería Química, Ingeniería Mecánica Eléctrica, Escuelas de Ciencias, Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS), Postgrado Maestría en Sistemas Mención Construcción y Mención Ingeniería Vial. **Carreras:** Ingeniería Mecánica, Ingeniería Electrónica, Ingeniería en Ciencias y Sistemas, Licenciatura en Matemáticas, Licenciatura en Física. **Centros:** de Estudios Superiores de Energía y Minas (CESEM). Guatemala, Ciudad Universitaria, Zona 12, Guatemala, Centroamérica.

Escuelas: Ingeniería Civil, Ingeniería Mecánica Industrial, Ingeniería Química, Ingeniería Mecánica Eléctrica, Escuela de Ciencias, Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS), Postgrado Maestría en Sistemas Mención Construcción y Mención Ingeniería Vial. **Carreras:** Ingeniería Mecánica, Ingeniería Electrónica, Ingeniería en Ciencias y Sistemas, Licenciatura en Matemáticas, Licenciatura en Física. **Centros:** de Estudios Superiores de Energía y Minas (CESEM). Guatemala, Ciudad Universitaria, Zona 12, Guatemala, Centroamérica.

**UNIVERSIDAD SAN CARLOS
DE GUATEMALA**



FACULTAD DE INGENIERÍA

Guatemala, 25 de noviembre de 2014

Señores Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos

Respetuosamente les comunico que he revisado y aprobado, en mi calidad de Coordinador de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria, el documento de Estudio Especial titulado:

Evaluación de la remoción de nitratos en solución acuosa por bentonita modificada

Presentado por el estudiante:

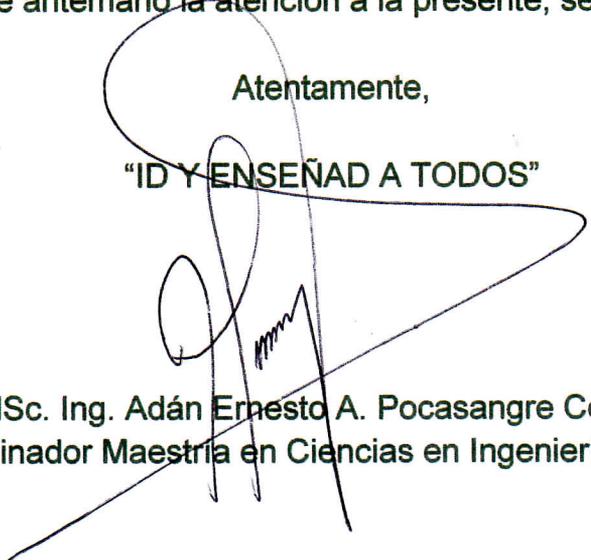
Ing. Edwin Josué Espina Sandoval

Les manifiesto que el estudiante ha cumplido en forma satisfactoria con todos los requisitos establecidos por la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS) y por la Universidad de San Carlos de Guatemala en la realización de su estudio.

Agradeciéndoles de antemano la atención a la presente, se suscribe de ustedes,

Atentamente,

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"



MSc. Ing. Adán Ernesto A. Pocasangre Collazos
Coordinador Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria

Guatemala, 26 de noviembre de 2014

Ingeniero Pedro Saravia
Director de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ing. Saravia:

Por este medio extiendo constancia a la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, de la Facultad de Ingeniería, que se ha realizado satisfactoriamente la revisión y corrección de estilo del trabajo de graduación de Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria: **Evaluación de la remoción de nitratos en solución acuosa por bentonita modificada** del estudiante ingeniero **Edwin Josué Espina Sandoval** (carné: 100023567).

Para los requerimientos que su despacho necesite.

Atentamente,

(f) y sello



Licda. Rosa Amelia González Domínguez
Unidad de Lingüística
Facultad de Ingeniería



Rosa Amelia González Domínguez
LICENCIADA EN LETRAS
Colegiado No. 5284

UNIVERSIDAD SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

Guatemala, 27 de noviembre de 2014

El director de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS) después de conocer el dictamen del tribunal examinador integrado por los profesores siguientes: MSc. Ing. Zenón Much Santos, MSc. Ing. Félix Alan Douglas Aguilar Carrera, MSc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis, así como el visto bueno del Coordinador de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria; MSc. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos y la revisión lingüística realizada por la Licenciada Rosa Amelia González Domínguez, Colegiada No.5284, al trabajo del estudiante Ing.Edwin Josué Espina Sandoval, titulado:**Evaluación de la remoción de nitratos en solución acuosa por bentonita modificada**. En representación de la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado, procede a la autorización del mismo, en Guatemala a los 27 días del mes de noviembre de 2014.

Imprímase

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”


MSc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis
DIRECTOR

The official stamp is circular and contains the following text: 'ESCUELA REGIONAL DE INGENIERIA SANITARIA Y RECURSOS HIDRAULICOS', 'FACULTAD DE INGENIERIA', and 'DIRECCION'. At the bottom of the stamp, the acronym 'U.S.C.' is visible.

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Creador supremo que ha guiado mis pasos e iluminado mi camino, por permitirme alcanzar este nuevo triunfo.
- Mis padres** Ing. Edwin Romeo Espina Lee y Licda. Alba Corina Sandoval de Espina, por darme la vida, por sembrar en mí el deseo de constante superación, por todo el apoyo y el amor incondicional, por escucharme, aconsejarme y estar siempre presente en mis luchas. Ustedes me inculcaron todos los valores que han hecho posible este día, este logro es tanto mío como de ustedes. Los quiero mucho.
- Mis amigos** Arq. Alba Kristel y Kevin Alejandro, por ser mis hermanos y mis amigos, por brindarme su apoyo, amor y por todo el tiempo compartido; que este logro los inspire a superarse siempre.
- Mis abuelos** José Romeo Espina Palma (q.e.p.d.), José Raúl Sandoval (q.e.p.d.), Leticia Lee Vda. de

Espina, Marta Luz Espina Palma (q.e.p.d.), por el amor incondicional, por las risas y los buenos recuerdos que me acompañarán toda la vida. Que Dios los tenga en su gloria.

Mis tíos

En especial a Dora Alicia que ha sido como una madre, por ser tan especial y estar pendiente de mí y por todas sus muestras de cariño.

Mis compañeros de estudio y amigos

Por todas las experiencias compartidas que fortalecieron nuestra amistad, sé que puedo contar con ustedes al igual que podrán contar conmigo. Espero que nuestra amistad prevalezca.

Mi familia en general

Que siempre me ha deseado lo mejor, gracias.

AGRADECIMIENTOS A:

Gloriosa y tricentenaria Universidad de San Carlos de Guatemala	Alma máter que me ha formado y provisto de vastos conocimientos, por ayudarme a cumplir uno más de mis sueños.
Facultad de Ingeniería	Por mi formación profesional.
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos-ERIS-	MSc. Joram Matías Gil, MSc. Adán Pocasangre Collazos, MSc. Julián Duarte, MSc. Jeser Nij, Dra. Malvina Hortensia de León, MSc. Juan José Sandoval, por mi formación; a MSc. Marta Lidia Samayoa, Dora María Cardoza y Frida Faggioly de Cáceres, por el apoyo brindado.
Laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria de la ERIS – USAC	En especial a Moisés Dubón, por el apoyo suministrado a lo largo del período de estudio y del tiempo en que se realizaron los experimentos en la remoción de nitratos del agua.
MSc. Ingeniero Zenón Much Santos	En nombre de la promoción, por nuestra formación a lo largo de la maestría, su apoyo desinteresado y su ayuda para el

desarrollo de este trabajo. Por su amistad,
¡muchas gracias!

**MSc. Ing. Pedro Saravia
Celis**

Por la formación, amistad e interés en el
desarrollo de la maestría y este estudio.

**MSc. Ing. Félix Aguilar
Carrera**

Por su apoyo en la revisión del estudio
especial.

**Municipalidad de Guatemala
y EMPAGUA**

En especial a la arquitecta Claudia Muñoz
y mis compañeros de trabajo en Ventanilla
Única, por sus ánimos y apoyo durante la
realización de esta meta.

A usted

Que lee este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XIII
INTRODUCCIÓN	XV
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XVII
OBJETIVOS.....	XIX
JUSTIFICACIÓN.....	XXI
VIABILIDAD	XXV
ALCANCES DEL ESTUDIO ESPECIAL	XXVII
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Nitratos	1
1.2. Características fisicoquímicas y química ambiental	2
1.3. Fuentes ambientales	3
1.4. Otras fuentes	5
2. TOXICOCINÉTICA.....	7
2.1. Efectos adversos	9
2.2. Efectos hematológicos.....	10
2.3. Efectos cardiovasculares.....	11
2.4. Efectos respiratorios	11
2.5. Poblaciones en riesgo	11
2.6. Niños menores de tres meses	12
3. TEORÍA DE LA REMOCIÓN DE NITRATOS.....	13

3.1.	Intercambio aniónico para remover nitratos	13
3.2.	Bentonita	13
3.3.	Eficiencia de adsorción de la bentonita	14
3.4.	Pozos de agua subterránea	15
3.4.1.	Aforo y caracterización del agua en pozos de abastecimiento	15
3.4.2.	Importancia de conocer la producción de un pozo de abastecimiento	15
3.5.	Caracterización del agua.....	16
4.	BREVE DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE NITRATOS A NIVEL MUNDIAL.....	19
4.1.	Antecedentes	19
5.	EL PROBLEMA EN LA REGIÓN CENTROAMERICANA	23
5.1.	Antecedentes	23
5.2.	Hechos en Guatemala.....	24
6.	DESCRIPCIÓN Y OBJETO DEL ESTUDIO.....	27
6.1.	Ubicación del pozo para estudio	27
7.	METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN	29
7.1.	Búsqueda de información.....	29
7.2.	Recolección de muestras de agua	30
7.3.	Tipo de muestras	31
7.4.	Número de muestras.....	31
7.5.	Adquisición de medio de remoción.....	32
7.6.	Selección del sitio para pruebas	33
7.7.	Análisis practicados.....	34
7.8.	Observaciones relevantes.....	34
7.9.	Fase de investigación.....	36
7.10.	Fase final.....	36

8.	MODELOS EXPERIMENTALES USADOS EN LA INVESTIGACIÓN....	39
8.1.	Planteamiento del modelo experimental.....	39
8.2.	Preparación del ácido clorhídrico y del medio de remoción.....	40
8.2.1.	Preparación del ácido clorhídrico comercial a HCl (2M)	40
8.3.	Primer modelo experimental.....	44
8.4.	Segundo modelo experimental	45
9.	RESULTADOS	47
9.1.	Datos de pH y nitratos obtenidos en el laboratorio al adicionar bentonita al agua extraída del pozo con 30 minutos de contacto	47
9.2.	Datos de pH y nitratos obtenidos en el laboratorio con 60 minutos de contacto	48
9.3.	Datos de pH y nitratos obtenidos en el laboratorio con 90 minutos de contacto	49
9.4.	Datos de pH y nitratos obtenidos en el laboratorio con 30 minutos de contacto a 100 rpm	51
9.5.	Datos de pH y nitratos obtenidos en el laboratorio con 30 minutos de contacto a 250 rpm	52
9.6.	Datos de pH, nitratos y turbiedad obtenidos en el laboratorio con sulfato de aluminio	52
9.7.	Datos de pH, nitratos y turbiedad obtenidos en el laboratorio con sulfato de aluminio	53
10.	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	55
10.1.	Discusión de los resultados obtenidos por medio de agitación del medio de remoción a temperatura constante	55
10.2.	Efecto del tiempo.....	55

10.3.	Efecto del pH.....	58
10.4.	Efecto de la cantidad de masa adsorbente	58
10.5.	Resultados de medición utilizando sulfato de aluminio	61
10.6.	Resultados de medición de la turbiedad	63
CONCLUSIONES.....		65
RECOMENDACIONES		67
BIBLIOGRAFÍA.....		69
APÉNDICES.....		73

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

1.	Ciclo del nitrógeno.....	2
2.	Fuentes de nitrógeno	8
3.	Formación de metahemoglobina.....	9
4.	Escala de pH y líquidos típicos de los distintos valores de pH.....	17
5.	Ubicación pozo.....	27
6.	Lugar de toma de muestras 1	30
7.	Lugar de toma de muestras 2	31
8.	Grafico bentonita-remoción de nitratos	56
9.	Grafico bentonita-remoción de nitratos	57
10.	Grafico bentonita-remoción de nitratos	57
11.	Grafico bentonita-remoción de nitratos	59
12.	Gráfico bentonita-remoción de nitratos	60
13.	Gráfico bentonita-remoción de nitratos	62
14.	Gráfico Turbiedad-sulfato de aluminio.....	62
15.	Gráfico bentonita-remoción de nitratos	63
16.	Grafico bentonita-remoción de nitratos	64
17.	Bentonita mesh 325 extraída de la aldea Los Cimientos	73
18.	Pesado de la bentonita a ser termoactivada	73
19.	Colocado de la cantidad de medio a preparar en vaso de precipitar y estufa para calentado y agitación.....	74
20.	Calentado y agitado durante 3 horas a 80 °C (se medía la temperatura con termómetro de mercurio constantemente)	74
21.	Medio activado	75
22.	Horno de secado.....	75
23.	Medio seco.....	76

24.	Medio listo para ser pulverizado	76
25.	Secuencia de pulverización con mortero y pistilo	77
26.	Medio pulverizado.....	77
27.	Vista general del Modelo Experimental #1 Columna de acrílico (en construcción)	78
28.	Vista General del Modelo Experimental #1. Columna de acrílico (en desinfección).....	79
29.	Preparación de la columna	80
30.	Colocación de los materiales	80
31.	Construcción de Estructura de Soporte de Filtros	81
32.	Prueba en acción.....	81
33.	Cambios de confinamiento de bentonita en columna de contacto.....	82
34.	Variación de la colocación de los medios para su evaluación	83
35.	Vista general del modelo piloto previo al modelo experimental #2	83
36.	Sedimentación	84
37.	Reactivo utilizado.....	84
38.	Pruebas para análisis	85
39.	Espectrofotómetro HACH	85
40.	Distintas dosis de bentonita termoactivada modelo experimental #2....	86
41.	Prueba de jarras para determinar concentración óptima	86
42.	Pruebas para análisis	87
43.	Espectrofotómetro HACH	87

TABLAS

I.	Datos de pH y nitratos obtenidos en el laboratorio al adicionar bentonita al agua extraída del pozo con 30 minutos de contacto.....	48
II.	Datos de pH y nitratos obtenidos en el laboratorio al adicionar bentonita al agua extraída del pozo con 60 minutos de contacto.....	49
III.	Datos de pH y nitratos obtenidos en el laboratorio al adicionar bentonita al agua extraída del pozo con 90 minutos de contacto.....	50
IV.	Media, mediana y desviación estándar para los datos obtenidos	50
V.	Datos de pH y nitratos obtenidos en el laboratorio al adicionar bentonita al agua extraída del pozo con 30 minutos de contacto a 100 RPM	51
VI.	Datos de pH y nitratos obtenidos en el laboratorio al adicionar bentonita al agua extraída del pozo con 30 minutos de contacto a 250 RPM	52
VII.	Datos de pH y nitratos obtenidos en el laboratorio al adicionar sulfato de aluminio con 20 minutos de contacto y 20 minutos de sedimentación	53
VIII.	Datos de pH y nitratos obtenidos en el laboratorio al adicionar sulfato de aluminio en prueba de jarras	54

GLOSARIO

Aforo	Medir el caudal de un líquido que pasa por una sección.
Aireación	Proceso de transferencia de oxígeno al agua por medios naturales o artificiales.
Bacterias aeróbicas	Organismos unicelulares y microscópicos que realizan todos sus procesos con la ayuda de oxígeno.
Caracterización de una muestra	La medición de los parámetros físicos, químicos y biológicos representativos de las aguas residuales en estudio.
Carga	Resultado de multiplicar el caudal por concentración.
Caudal	Volumen de un fluido que pasa por una sección transversal en la unidad de tiempo.
Cianosis	Coloración azulada de la piel debido a la presencia de concentraciones iguales o mayores a 5 g/dL de hemoglobina sin oxígeno en los vasos sanguíneos cerca de la superficie de la piel.
Coliformes totales	Bacterias aeróbicas y anaeróbicas

facultativas, bacilos gramnegativos no esporulados que fermentan lactosa con formación de ácido y gas después de 24 a 48 horas de incubación a 35 ± 0.5 °C, cuando se investigan por el método de tubos múltiples de fermentación.

Coliformes fecales

Bacterias del grupo coliforme procedentes de heces fecales de animales de sangre caliente, incluidos los seres humanos. También se les designa como termotolerantes o termorresistentes.

Desinfección

Destrucción selectiva de organismos que producen enfermedades.

Metahemoglobina

Hemoglobina con hierro en estado férrico, Fe(III) (es decir, oxidado). Este tipo de hemoglobina tiene una enorme afinidad por el oxígeno y no lo cede en los tejidos.

Metahemoglobinemia

Enfermedad caracterizada por la presencia de un nivel anormalmente alto de metahemoglobina en la sangre

Polaridad

Representa la uniformidad de distribución de las cargas eléctricas en una molécula.

Termoactivación

Cambio de las propiedades físicas y químicas

de una sustancia por medio de la variación de temperatura y un agente activador.

Toxicocinética

Conjunto de fenómenos que experimenta el tóxico desde su entrada a un organismo hasta su eliminación.

Tratamiento

Acción o conjunto de acciones que se ejecutan para remover sustancias contaminantes al agua.

RESUMEN

La presencia de nitratos (>50 mg/L, de acuerdo con el límite máximo permisible establecido por la Norma COGUANOR NTG 29001) en fuentes de abastecimiento es considerada como un claro indicador de contaminación, y su permanente incremento ha llegado a ser un problema común en años recientes. Este trabajo se realizó con el propósito de evaluar la remoción de nitratos por intercambio iónico al utilizar bentonita como medio de remoción por agitación mecánica. La bentonita procede de un banco de material ubicado en el departamento de Chiquimula.

La ciudad de Guatemala se abastece en gran medida, por medio de pozos de agua subterránea, varios de ellos tienen problemas de concentración de nitratos altos. El pozo ubicado en la zona 3, a un costado del Cementerio General, es uno de ellos y actualmente no cuenta con tratamiento alguno.

Para la caracterización del agua se recolectaron muestras en la salida del pozo y después de la cloración, los cuales se presentan en la sección de metodología. De los datos obtenidos en los muestreos realizados en las fechas comprendidas del 29/04/2008 al 24/04/2013 se elaboró un resumen de resultados representativo para determinar las condiciones actuales del agua (ver cuadro anexo). Posteriormente la bentonita se termoactivó y se preparó para efectuar las pruebas de remoción por medio de agitación a distintas velocidades y tiempos de contacto a fin de escoger las condiciones óptimas de remoción.

En los resultados obtenidos se observó una remoción óptima de 164,60 mg/L hasta 84,80 mg/L de NO₃⁻ alcanzando un 48,48 por ciento, con un tiempo de contacto de 30 minutos y una velocidad de agitación de 200 RPM.

Se utilizó sulfato de aluminio a efectos eliminar la turbiedad producida y mejorar la eficiencia de remoción, encontrándose que, debido al bajo pH de la mezcla por la acidez de la bentonita termoactivada este no alcanzó los resultados esperados.

En este documento se presenta la investigación a nivel de laboratorio, la cual fue base para el planteamiento del proceso de investigación, los resultados se muestran en tablas y gráficas y las limitaciones, hallazgos, conclusiones y recomendaciones que surgieron del proceso de investigación desarrollado.

INTRODUCCIÓN

En algunas partes de la ciudad se han detectado concentraciones de nitratos en las aguas subterráneas, en la mayoría de los casos se supone que, estas en aguas subterráneas son resultado de la descarga de aguas residuales sin tratar y de la agricultura. Guatemala es la ciudad más grande de Centroamérica. Tiene una población de aproximadamente 4 000 000 de personas y un alto índice de crecimiento demográfico a nivel regional.

Es importante saber que en la ciudad de Guatemala más de 50 por ciento de los suministros de agua públicos provienen de fuentes de agua subterránea. Una fuente de abastecimiento subterránea localizada en un contexto urbano con poca o ninguna cultura sobre desarrollo sostenible, es un recurso altamente vulnerable a la contaminación por actividades antropogénicas.

Los estudios, hasta ahora en Guatemala, centrados en la reducción de NO₃⁻ en los sedimentos arcillosos, son nulos.

Los nitratos son contaminantes inorgánicos, su movilidad y estabilidad los hace muy peligrosos en los sistemas aeróbicos como el agua subterránea. Este contaminante se ha encontrado con un valor máximo de 201,60 miligramos/l, según informes de laboratorio efectuados en el pozo en cuestión, mientras que el límite máximo recomendado por la Organización Mundial de la Salud es de 45 miligramos/L como N en NO₃⁻.

Varios estudios revelan que las altas concentraciones de este contaminante produce enfermedades en recién nacidos, tales como: cianosis infantil o metahemoglobinemia (síndrome del bebé azul).

Con el presente trabajo se evaluará la eficacia de la bentonita para la remoción de nitratos y su posible utilización para el tratamiento de aguas subterráneas.

Para realizar este estudio se debe hacer un análisis de caracterización de agua potable, que inicia determinando diversos parámetros físicos y químicos del agua que sale de los pozos, y de la bentonita (arcilla) a utilizar.

Terminada la fase de caracterización se evaluará la eficacia de remoción de estas sin activar, y con termoactivación por ácido clorhídrico y sulfúrico, con la finalidad de escoger una solución óptima y viable para la remoción de nitratos.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Recientemente, en la ciudad de Guatemala se han encontrado niveles de nitratos superiores a los permitidos por la Norma NTG 29001 cuyo límite máximo permisible es de 50 mg/l como NO₃⁻ en tres pozos de abastecimiento de agua potable. Estos resultados impiden que este parámetro de contaminación del agua cumpla con lo establecido en la legislación guatemalteca vigente y es una posibilidad que en un tiempo no previsto, se contaminen más fuentes, afectando a las comunidades que se encuentran alrededor, ya que se pone en riesgo su salud.

En algunos países experimentos realizados utilizando bentonita (arcilla) para la remoción de nitratos han dado resultados favorables por lo que en base a esta experiencia y la problemática anterior se planteó el cuestionamiento principal:

¿En qué condiciones puede la bentonita (arcilla) procedente de un banco nacional remover nitratos del agua por medio de adsorción por agitación mecánica para ser tomada en cuenta como una alternativa ad hoc de tratamiento en nuestro país?

Con esta interrogante queda definido el problema a resolver en el presente estudio especial, esencialmente, porque cualquier cuestionamiento en cuanto a la selección de alternativas viables y sostenibles debe girar en torno a la calidad, desde un punto de vista holístico para prestar un servicio de calidad y sostenible a las comunidades.

OBJETIVOS

General

Evaluar la remoción en la concentración de nitratos en el agua procedente del pozo de agua potable ubicado en la zona 3 utilizando bentonita termoactivada por ácido clorhídrico.

Específicos

1. Caracterizar el agua extraída del pozo de agua potable ubicado en la zona 3 por medio de la medición de sus parámetros físicos y químicos más representativos.
2. Evaluar si el agua procedente del pozo de agua potable es apta para el consumo humano. con base en los parámetros establecidos para agua potable por la Norma COGUANOR NTG 29001 y los parámetros recomendados por la OMS.
3. Evaluar las condiciones óptimas de remoción de nitratos por intercambio iónico, utilizando bentonita (arcilla tipo montmorillonita) proveniente del banco de la aldea Los Cimientos localizada en el departamento de Chiquimula termoactivada con ácido clorhídrico.
4. Aportar por medio de este estudio bases para futuras investigaciones sobre métodos de reducción de nitratos.

Hipótesis

La termoactivación de una bentonita procedente de un banco nacional por medio de ácido clorhídrico a través de agitación mecánica está relacionada positivamente con la remoción de nitratos presentes en aguas subterráneas para el consumo humano.

JUSTIFICACIÓN

La importancia de las aguas subterráneas en el abastecimiento de agua con la calidad adecuada para uso y consumo humano es indiscutible, pues gracias a ella muchas regiones del mundo han podido ser habitadas. Este es el caso de la ciudad de Guatemala en donde la Empresa Municipal de agua (EMPAGUA) abastece de este servicio por medio de un conjunto de 66 pozos profundos (operando) localizados en el área urbana de la ciudad, de un total de 94 perforados, los cuales cubren una demanda de un metro cúbico por segundo, aproximadamente el 51,3 por ciento de la demanda total.

En algunos de estos pozos, las concentraciones por nitratos son más altas que el límite máximo permitido recomendado por la OMS de 45 mg/L, siendo este a veces incluso mayor que 200 mg/L. Además de cloración, en la actualidad no existe ningún tratamiento de aguas subterráneas en la ciudad. Un nuevo proyecto se encuentra en desarrollo, este pretende suministrar 2,5 metros cúbicos adicionales por segundo provenientes de aguas subterráneas y 4,7 metros cúbicos por segundo provenientes de agua superficial. El agua subterránea se obtendrá de pozos nuevos ubicados al norte de la ciudad y el agua superficial de dos ríos localizados afuera de la ciudad.

Sin embargo, la presencia de nitratos tanto en aguas superficiales como en subterráneas es un claro indicador de contaminación (>50 mg/L, de acuerdo con el límite máximo permisible establecido por la Norma COGUANOR NTG 29 001) que amenaza este recurso. El incremento constante de nitrógeno en forma de nitratos ha llegado a ser un problema común en años recientes en varias partes del mundo. Actualmente, varias de las fuentes subterráneas de

abastecimiento de agua en la ciudad de Guatemala presentan problemas de contaminación por presencia de nitratos.

La presencia de nitrógeno en sus diferentes formas tiene serias implicaciones, ya que:

- Como N-NH_3 causa toxicidad para peces y la vida acuática, a pH alcalino provoca la reducción de los niveles de oxígeno disuelto en el agua al oxidarse el N-NH_4^+ en N-NO_x .
- Interfiere en la desinfección del agua, principalmente la potable al reaccionar el N-NH_4^+ durante la cloración.
- Provoca la corrosión de ciertos metales y materiales de construcción en su forma N-NH_4^+ .
- Produce la metahemoglobinemia en infantes en sus formas oxidadas NO_x .
- Promueve la eutrofización acelerada (crecimiento excesivo de plantas) cuando se haya como N-NO_3 .

Además del riesgo que representa para la salud pública, la contaminación de las aguas subterráneas por nitrato imputa mayores costos de mitigación en los lugares afectados.

De aquí parte la necesidad imperante de este proyecto. Los objetivos de este proyecto de investigación son adquirir experiencia sobre el funcionamiento de los nitratos y los procesos de remoción en las condiciones específicas de

Guatemala (a bajo costo). Los resultados de este estudio de investigación se deben utilizar para la toma de decisiones en relación a la opción de tratamiento más adecuada para la eliminación de nitrato en Guatemala y para la posterior planificación de una planta de tratamiento de agua potable a gran escala. El objetivo de la calidad del agua para todos procesos será una concentración de nitratos que se encuentre bajo los parámetros recomendados por la OMS después del tratamiento. Asimismo, todas las necesidades de las directrices para el agua potable vigentes se deben cumplir.

VIABILIDAD

La información que se derive de esta investigación proporcionará datos importantes que podrán ser utilizados por futuros investigadores, al mismo tiempo brindará antecedentes para continuar con una línea de investigación importante para el sector salud.

Para el desarrollo de las actividades de esta investigación se contó con:

- Recurso humano y económico, así como de materiales y equipo para su implementación.
- Apoyo de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos -ERIS- a través del Laboratorio de Química y Microbiología Sanitaria Dra. Alba Tabarini Molina.
- Información bibliográfica proporcionada por la biblioteca de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos hidráulicos -ERIS-.
- Asesoramiento académico por parte de los catedráticos de la ERIS.

ALCANCES DEL ESTUDIO ESPECIAL

- Evaluación de la remoción de nitratos en solución acuosa por bentonita modificada

Como parte de la realización de este estudio especial se pretendió:

1. Identificar en la República de Guatemala pozos con concentraciones de nitratos superiores al valor establecido por la Norma COGUANOR NTG 29001.
2. Identificar en la República de Guatemala una bentonita (arcilla tipo montmorillonita), para utilizarla como medio de remoción de nitratos
3. Desarrollar un modelo experimental en donde se pudiese evaluar la capacidad de remoción de nitratos de la bentonita propuesta en la hipótesis, determinando las concentraciones de nitratos antes y después de cada prueba para establecer el porcentaje de remoción.
4. Evaluar características físicas y químicas de las muestras de agua después de la prueba para determinar si la metodología usada no afecta otros parámetros de la calidad del agua que pudieran ser no agradables o perjudiciales para la salud.
5. Identificar las limitaciones y hallazgos a fin de que estos sean tomados en cuenta en posteriores investigaciones.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Nitratos

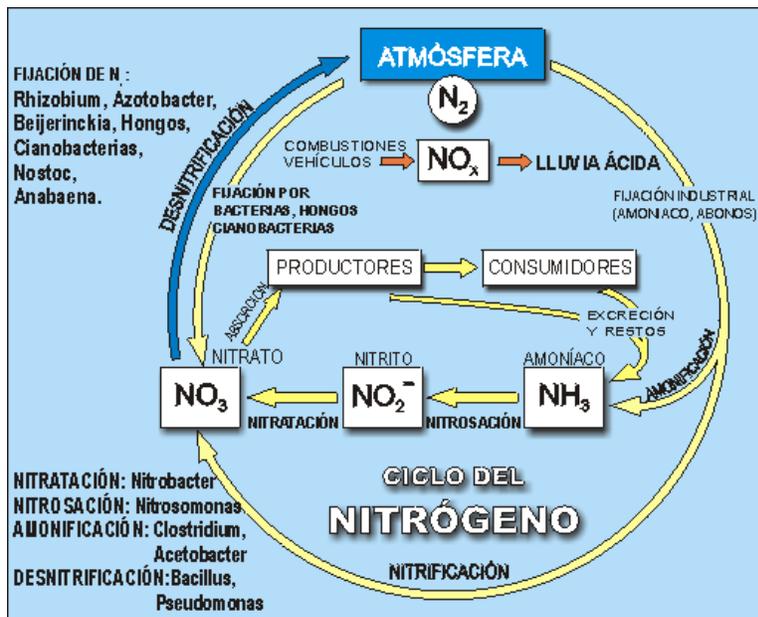
La toxicidad de los nitratos se conoce desde el siglo XX. En 1895, Mayo describió algunas intoxicaciones en ganado y las atribuyó a la ingestión de nitratos. En 1945, Conway asoció por primera vez la metahemoglobinemia fatal en un infante con la ingestión de agua de pozo contaminada con nitratos. Desde entonces hasta 1979, se habían reportado cerca de dos mil casos similares en todo el mundo, aproximadamente el 10 por ciento de los cuales causaron la muerte de los afectados. En Estados Unidos, el caso más reciente de muerte por esta causa ocurrió en 1987.

Es importante destacar que, aunque el agente responsable de esta enfermedad son los nitritos, debido a que estos se forman naturalmente a partir de los nitratos, un factor determinante en la incidencia de esta enfermedad es la concentración de nitratos en el agua y los alimentos. Para dar una idea de la gravedad y magnitud potencial de este problema, basta mencionar que los datos obtenidos a través del Global Environmental Monitoring System (GEMS) indican que el 10 por ciento de los ríos que se estudiaron en todo el mundo tenían concentraciones de nitratos en exceso del límite permisible que recomienda la OMS. Los estudios de GEMS, también encontraron que, en Europa, el 5 por ciento de los ríos tenían concentraciones de nitratos hasta 45 veces mayores que la concentración natural. (Palacios, 1997).

1.2. Características fisicoquímicas y química ambiental

Los iones nitrato (NO_3^-) y nitrito (NO_2^-) son aniones inorgánicos de origen natural que forman parte del ciclo del nitrógeno. Durante el ciclo, el nitrógeno orgánico es descompuesto por las bacterias en sustancias más simples como el amoníaco, este a la vez se oxida para formar iones nitrito, los cuales al oxidarse nuevamente forma nitratos tal y como se muestra en la figura 1.

Figura 1. Ciclo del nitrógeno



Fuente: Lenntech (2014)

Los organismos superiores, incluyendo al hombre, no pueden aprovechar directamente el nitrógeno del aire, que es esencial para la vida y requieren de la intervención de los microorganismos fijadores de nitrógeno que lo pueden captar de la atmósfera y combinarlo enzimáticamente, para formar compuestos orgánicos.

En general, los nitratos (sales del ácido nítrico, HNO_3) son muy solubles en agua debido a la polaridad del ion; por lo que se tiende a utilizarlos siempre que se necesite una solución de cationes, la estructura de este es plana y de alta estabilidad. Se conocen la mayoría de los nitratos de todos los metales en los estados de oxidación más comunes. Esta es la forma del nitrógeno más estable termodinámicamente en presencia de oxígeno, por lo que en los sistemas acuáticos y terrestres, los materiales nitrogenados tienden a transformarse en nitratos. (Méndez, 2010).

El ion nitrito es menos estable que el ion nitrato, es muy reactivo y puede actuar como agente oxidante y reductor, por lo que solo se encuentra en cantidades apreciables en condiciones de baja oxigenación. Esta es la causa de que los nitritos se transformen rápidamente para dar nitratos y de que en general, estos últimos predominen en las aguas, tanto superficiales como subterráneas, así como en el ambiente. Esta reacción de oxidación se puede efectuar en los sistemas biológicos y por factores abióticos.

El uso excesivo de fertilizantes nitrogenados incluyendo el amoníaco, así como la contaminación causada por la acumulación de excretas humanas y animales, pueden contribuir a elevar la concentración de nitratos en agua. Generalmente, los nitratos son solubles y no se adsorben a los componentes del suelo, por lo que son movilizados con facilidad por las aguas superficiales y subterráneas.

1.3. Fuentes ambientales

Debido a sus propiedades físicas no pueden olerse ni sentirse y la presencia en concentraciones potencialmente peligrosas es detectada cuando se manifiesta un problema de salud. Con frecuencia es difícil precisar el origen

de la contaminación, debido a que puede provenir de muchas fuentes. La entrada de los nitratos a las aguas subterráneas es un resultado de procesos naturales o del efecto directo o indirecto de las actividades humanas. Los procesos naturales incluyen la precipitación, el intemperismo de los minerales y descomposición de la materia orgánica.

Los nitratos provenientes de las actividades humanas incluyen: la escorrentía de terrenos cultivados, efluentes de lagunas y tanques sépticos, fertilización excesiva con nitrógeno, deforestación y el cambio en la materia orgánica del suelo como resultado de la rotación de cultivos.

El problema con los nitratos, es que son contaminantes móviles en el agua subterránea que no son adsorbidos por los materiales del acuífero y no precipitan como un mineral. Estos dos factores permiten que grandes cantidades de nitrato disuelto permanezcan en el agua subterránea. Debido a su naturaleza soluble, los nitratos tienden a viajar grandes distancias en la subsuperficie, específicamente en sedimentos altamente permeables o rocas fracturadas.

En las zonas agrícolas, los fertilizantes nitrogenados son la fuente principal de contaminación con nitratos de los acuíferos poco profundos, de los cuales proviene la mayoría del agua de bebida de las poblaciones rurales. A pesar de esta realidad, el número de estudios sobre la presencia de nitratos en las aguas subterráneas es muy bajo en estos países. La contaminación no puntual se distribuye en amplias áreas como son los campos donde los fertilizantes nitrogenados han sido aplicados.

El único control del nitrato por debajo de la superficie es la reducción del nitrato o denitrificación. La reducción del nitrato es una reacción natural en la

cual el nitrato es reducido a gases de nitrógeno menos peligrosos, por la acción de bacterias. En donde esta reducción no ocurre, los nitratos que persisten en los abastecimientos de agua son un riesgo; así, áreas con alto riesgo incluyen acuíferos bajo agricultura intensiva y la vecindad de campos con alta densidad de tanques sépticos. Por su naturaleza, los acuíferos son lentos para contaminarse, pero una vez que sean contaminados, difícilmente se autodepuran. La única opción para evitar futuras contaminaciones por nitratos en acuíferos superficiales susceptibles, es iniciar con el control del uso del suelo.

Por otra parte, la cantidad de óxidos de nitrógeno (NOx) que se generan por el uso de combustibles fósiles en los vehículos automotores y los procesos industriales es muy elevada y una proporción considerable de este nitrógeno regresa a la superficie terrestre en forma de nitratos.

En la industria de quesos de algunos países suelen emplearse los nitratos de sodio o potasio como agentes antimicrobianos.

1.4. Otras fuentes

Los vegetales son la fuente de más del 70 por ciento de los nitratos en una dieta común, pero no por ello causan problemas a la salud. La concentración de nitratos en los vegetales depende, sobre todo, del uso de fertilizantes nitrogenados.

2. TOXICOCINÉTICA

En los humanos, el nitrato ingerido se absorbe rápidamente en el intestino delgado y se distribuye en el organismo, el nitrato llega al intestino grueso a través de la sangre y ahí se convierte rápidamente (en parte por los microorganismos fecales) en nitrito, el cual es muy reactivo y se reabsorbe a la sangre.

El nitrato, también se puede convertir en nitrito en la saliva, como resultado de la reducción bacteriana; esta transformación depende de la microflora oral y de las características de la dieta. La exposición oral a altas concentraciones de nitratos causa aumentos importantes en la concentración de nitritos en la saliva.

En cuanto a los nitritos, se absorben por difusión a través de la mucosa gástrica y la pared intestinal.

Figura 2. Fuentes de nitrógeno

Agente	Fuente
NITRATOS/NITRITOS INORGANICOS	Agua de pozos contaminados Conservadores de productos carnicos Algunos vegetales (jugo de zanahoria, espinacas, etc.) Tratamientos a base de nitrato de plata para quemaduras Sales de uso industrial Contaminantes de los tanque de oxido nitroso para anestesia
NITRITOS ORGANICOS	
Nitritos de butilo e iso-butilo	Propelentes para desodorantes de habitaciones
Nitrito de amilo	Inhalantes en el equipo de antidotos para cianuros
Nitroglicerina	Medicamentos orales, sublinguales o transdermicos para el tratamiento de la angina
OTROS	
Nitrobenceno	Disolventes industriales, limpiadoes de armas
Anestésicos locales	Benzocaina, lidocaina, propitocaina, prilocaina
Sulfonamidas	Medicamentos antibacterianos
Fenazopiridina	Piridium
Antimaláricos	Cloroquina, primaquina
Sufonas	Dapsone
Ac. P. aminosalicílico	Bactericida
Productos de la combustión	Incendios, incineración

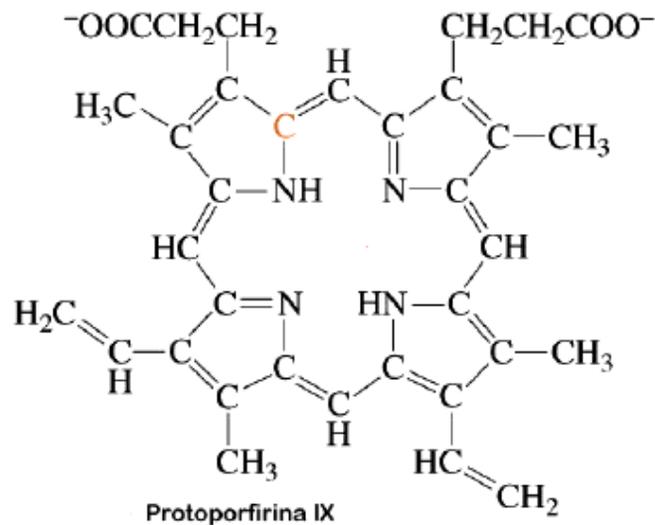
Fuente: modificado de ATSDR: (1991)

Después de la absorción, tanto nitratos como nitritos se distribuyen con rapidez a todos los tejidos. No se ha demostrado que los nitritos se bioacumulen.

Una vez en la sangre, el nitrito reacciona con el ion ferroso (Fe^{+2}) de la desoxihemoglobina, formando metahemoglobina en la cual el hierro se encuentra en estado férrico (Fe^{+3}), por lo que es incapaz de transportar el oxígeno.

Se ha demostrado que parte del nitrato se puede excretar a través de la leche humana.

Figura 3. Formación de metahemoglobina



Fuente: modificado de García Roché et al: (1994).

2.1. Efectos adversos

Como ya se dijo, el agente tóxico específico es el ion nitrito, el cual se forma naturalmente en el organismo humano a partir de los nitratos, cuando se reúnen ciertas condiciones que se detallan más adelante.

Aunque aún no hay pruebas concluyentes de que la ingestión de nitratos o nitritos cause efectos carcinogénicos y se requieren más estudios al respecto, esta posibilidad no debe desestimarse, ya que las nitrosaminas tienen un importante potencial carcinogénico.

Las siguientes condiciones favorecen la reducción de nitratos a nitritos:

- pH elevado en el estómago
- Cierta flora microbiana intestinal
- Alorhidria gástrica
- Algunas enteritis graves

A menos que existan estas condiciones, el nitrato ingerido se metaboliza y excreta sin producir efectos adversos aparentes. Independientemente de si el nitrito se ingirió o inhaló como tal, o si fue producido in vivo a partir de los nitratos, su principal efecto es la metahemoglobinemia.

Es importante subrayar que, en un individuo normal, los niveles de metahemoglobina pueden ser de hasta 0,24 g/100 mL de sangre y que la cianosis puede llegar a presentarse en concentraciones de 0,5 g/100 mL de sangre, lo que indica que la diferencia entre la concentración normal y la concentración tóxica es muy pequeña.

2.2. Efectos hematológicos

El principal mecanismo de toxicidad de los nitritos es la oxidación de ion ferroso (Fe^{+2}) en la desoxihemoglobina a ion férrico (Fe^{+3}), lo que produce la metahemoglobina, la cual no puede unirse de manera reversible al oxígeno ni transportarlo. Dependiendo del porcentaje de la hemoglobina total que se encuentra en forma oxidada, los signos y síntomas son los de anoxia con cianosis, disritmias cardíacas y falla circulatoria, con un aumento progresivo de efectos sobre el SNC, los que van desde mareo ligero y letargia, hasta coma y convulsiones.

Los signos clásicos de la metahemoglobinemia son la cianosis que no responde al suministro de oxígeno y el color chocolate de la sangre. La cianosis es central, de color café chocolate o gris pizarra. Afecta al tronco y la porción proximal de las piernas, así como a las extremidades distales y las membranas mucosas, se debe al color café-chocolate oscuro de la metahemoglobina y, por lo común, se observa a concentraciones de 10 a 15 por ciento de la hemoglobina total.

2.3. Efectos cardiovasculares

En dosis altas, el nitrito es un fuerte vasodilatador, a causa de su acción relajante sobre el musculo liso vascular, por lo que puede causar hipotensión y shock.

2.4. Efectos respiratorios

En los casos de metahemoglobinemia grave, especialmente en niños pequeños o cuando se han presentado hipotensión y shock, se puede desarrollar acidosis metabólica. En los pacientes con metahemoglobinemia se han desarrollado disnea y taquipnea.

2.5. Poblaciones en riesgo

Los riesgos de la exposición a nitratos y nitritos para la salud no dependen únicamente de la exposición, sino que en ellos influyen la existencia de condiciones favorables para la reducción de nitratos a nitritos y algunos factores inherentes al individuo. Esto impide que se pueda formular una relación dosis-respuesta con respecto a la presencia de nitratos en el agua o en los alimentos.

2.6. Niños menores de tres meses

Estos niños están en riesgo especial de desarrollar metahemoglobinemia aguda a causa de la exposición a nitratos cuando se les alimenta con leche en polvo que ha sido preparada con agua de pozos rurales que, como ya se indicó, muy frecuentemente está contaminada con nitratos. Esto se debe a que el pH del tracto gastrointestinal en los bebés es normalmente mayor que en los niños mayores y en los adultos, lo que favorece la reducción bacteriana del nitrato ingerido. La gastroenteritis con vómito y diarrea puede acelerar la formación de nitritos.

3. TEORÍA DE LA REMOCIÓN DE NITRATOS

Hay un gran número de tecnologías de tratamiento disponibles en el mercado para la remoción eficiente de los nitratos en agua potable e.g. electrodiálisis, osmosis inversa, intercambio iónico, remoción catalítica, y tratamientos biológicos. Pero estas técnicas son de alto costo y requieren mantenimiento por parte de personal calificado lo cual no hace viable su implementación y, por tanto, se vuelve imperativo encontrar soluciones económicamente viables para la remoción de nitratos en aguas subterráneas.

3.1. Intercambio aniónico para remover nitratos

La resina más efectiva para remover nitratos es una básica fuerte que usa cloruro de sodio como regenerador. Todas las resinas intercambiadores de aniones remueven preferentemente los aniones divalentes, por lo que eliminan nitratos y sulfatos mediante su reemplazo por cloruros. Ello constituye el principal problema de aplicación, puesto que, por lo regular, las aguas subterráneas que contienen nitratos contienen sulfatos lo que agota con mayor rapidez la capacidad de la resinas. Otra desventaja es que se consume el 5 por ciento del agua tratada para preparar la salmuera de regeneración, consumo que se incrementa con el contenido de sulfatos. Por todo esto, la remoción de los nitratos es considerada aún como antieconómica.

3.2. Bentonita

La bentonita es utilizada en una variedad de aplicaciones en purificación de agua debido a sus excelentes propiedades de absorción y adsorción.

Los yacimientos de bentonita de la aldea Los Cimientos, en Chiquimula fueron explorados técnicamente por la misión geológica del Japón (1982), quienes a su vez efectuaron un estudio de mercado, precisando así las probabilidades de desarrollo económico y anticipando parámetros financieros.

Los únicos yacimientos conocidos y en explotación de bentonita en Guatemala, están localizados a 16 kilómetros al suroeste de Chiquimula en la aldea llamada los cimientos, departamento de Chiquimula. Son fácilmente accesibles desde el camino vecinal que conduce de Chiquimula a Ipala por medio de un corto desvío de 1,6 kilómetros de longitud. La bentonita se distribuye en un área de 1 100 metros de longitud y 200 metros de ancho, área que incluye la aldea Los Cimientos.

La bentonita ocurre en afloramientos de rocas volcánicas terciarias de composición riolítica, llamada formación Los Cimientos, los cuales están situados al sur de la gran falla de Jocotán. Estas rocas volcánicas pertenecen probablemente al Grupo Padre Miguel de edad terciaria.

3.3. Eficiencia de adsorción de la bentonita

La termoactivación de la bentonita (arcilla) es un proceso que permite la extracción controlada de los iones de alúmina de su estructura cristalina introduciendo un nivel aceptable de acidez. El proceso modifica las propiedades de su textura aumentando su porosidad y área superficial.

Se han realizado estudios que demuestran la eficiencia de la bentonita al remover nitratos por intercambio aniónico del ion cloruro: Quintana P., Mena-Dura, C.J., Sun Kuo M.R., Lopez T.J., Azamar-Barrios J.A., Aguilar D.H., Dominguez M.I., Odriozola J.A., 2007.

Se prevé que teniendo un banco disponible en el país, se pueda desarrollar una oportunidad de explotación al utilizarlo en un futuro para la remoción de nitratos en pozos de agua para consumo, entre otros.

3.4. Pozos de agua subterránea

3.4.1. Aforo y caracterización del agua en pozos de abastecimiento

Para realizar un estudio de agua potable en un pozo es importante conocer la calidad del agua que produce. El agua se caracteriza por tres tipos de parámetros: físicos, químicos y biológicos. Además, para realizar una caracterización completa se ha de conocer la producción que sale del pozo. Según información proporcionada por la Dirección de Fuentes de Abastecimiento Subterránea de EMPAGUA el caudal de producción del pozo es de 5.699 m³/hora.

3.4.2. Importancia de conocer la producción de un pozo de abastecimiento

La relación de volumen de agua y el tiempo, es comúnmente llamada caudal, este se mide en unidades de volumen o capacidad divididas dentro de unidades de tiempo. Es importante conocer el caudal del pozo y no únicamente la calidad del agua que ingresa a dicha planta.

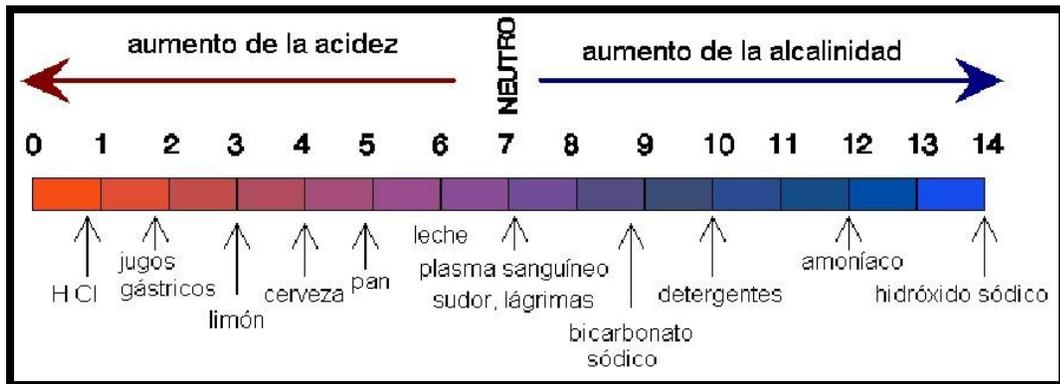
3.5. Caracterización del agua

El proceso de caracterización del agua es vital para conocer el tipo de tratamiento adecuado para mejorar la calidad del agua, esta debe incluir parámetros físicos, químicos y biológicos. Si bien estos tres tipos de parámetros tienen características totalmente distintas, están correlacionados unos con otros. Por ejemplo: de los parámetros físicos depende la calidad química del agua, la cantidad de bacterias y el tipo de microorganismos.

A continuación se hace una descripción de los parámetros analizados y otros, que debido a su relevancia, no se analizaron en el proceso de caracterización de agua del pozo, pero que conviene definir en este estudio:

Potencial de hidrógeno: es comúnmente llamado pH, es una medida de la acidez o alcalinidad del agua. Este valor indica la concentración de iones de hidrógeno (H_3O^+) presentes en el agua. Este valor fue acuñado por el químico danés Sorensen, quien lo definió como el logarítmico negativo de base 10 de la actividad de los iones hidrógeno presentes en el agua. El potencial de hidrógeno se mide en una escala propia que va desde 0 hasta 14.

Figura 4. Escala de pH y líquidos típicos de los distintos valores de pH



Fuente: <http://javeriana.edu.co/Facultades/Ciencias/neurobioquimica/libros/celular/agua.html> .
 Consulta: noviembre de 2013

- **Nitrógeno total:** es la cantidad de nitrógeno en todas sus formas disueltas en el agua, la química del nitrógeno es compleja debido a los varios estados de valencia que puede tener este elemento, los cambios de valencia en el nitrógeno se dan por los microorganismos vivos en el agua, según sean sus condiciones aerobias o anaerobias. Las formas de nitrógeno de mayor interés son: amoníaco, nitritos, nitratos, amonio y nitrógeno orgánico. La unidad de medida es: miligramos dividido litros (mg/L).
- **Nitrógeno en nitritos (NO_2^-):** este raramente aparece en el agua, que exista este compuesto no es más que un indicador de un proceso biológico activo en el agua. La unidad de medida es: miligramos dividido litros (mg/L).
- **Nitrógeno en nitratos (NO_3^-):** el nitrógeno en forma de nitratos está presente en el anión NO_3^- , se forma en su estado de oxidación V^+ , se encuentra en el centro de un triángulo formado por tres moléculas de

oxígeno y es característico de un proceso biológico aerobio dentro del agua. La unidad de medida es: miligramos dividido litros (mg/L).

- Nitrógeno en amoníaco (NH_3): es un compuesto químico formado por tres moléculas de hidrógeno y una de nitrógeno, regularmente se presenta en forma de gas, su presencia es un indicador de un proceso anaerobio. La unidad de medida es: miligramos dividido litros (mg/L).
- Nitrógeno amoniacal (NH_4^+): se considera como nitrógeno amoniacal todo el que existe como ion amonio en equilibrio, es un indicativo de un proceso de descomposición anaerobia. La unidad de medida es: miligramos dividido litros (mg/L).

4. BREVE DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE NITRATOS A NIVEL MUNDIAL

4.1. Antecedentes

En los primeros siglos de la civilización, el agua superficial era la única fuente de la que se necesitaba saber. La población humana era menos de una décima parte del uno por ciento del tamaño de lo que es ahora; el humano se asentaba en los bancos de los ríos y estaba relativamente limpia. Actualmente se continúa pensando en las aguas superficiales como el recurso principal, pero desde el siglo pasado la población se ha incrementado y los ríos se han degradado en su calidad, y nuestra dependencia de las aguas subterráneas de bombeo se ha disparado. Contrario a la impresión popular de que al menos las aguas de nuestros manantiales y pozos son de mejor calidad, estamos descubriendo un patrón de contaminación generalizada allí también.

Las aguas subterráneas se encuentran, generalmente, mejor protegidas frente a la contaminación que las aguas superficiales. Sin embargo, esta protección puede verse reducida si por ejemplo; se inyectan directamente productos contaminantes por debajo de la superficie del suelo en el acuífero como consecuencia del lixiviado de residuos depositados en la superficie (vertederos de basura y rellenos sanitarios no controlados) o bien aguas residuales domésticas, reciclado de efluentes y sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas que descargan en pozos de absorción. Una vez incorporado el contaminante al flujo subterráneo, resulta muy difícil y costoso tanto el detectar su presencia como conocer su desplazamiento y evolución o detenerlo antes de su llegada a pozos y sondeos de explotación.

Además, en muchos casos es prácticamente imposible eliminarlo o extraerlo de la formación permeable en la que puede permanecer contaminando el agua durante largos períodos de tiempo.

La contaminación del agua subterránea es en muchos casos, un proceso muy difícilmente reversible debido a la dificultad de regeneración del acuífero aún cuando esta sea económicamente viable. Esto es en gran medida el trabajo de otro factor oculto: la tasa de renovación del agua subterránea es muy lento en comparación con la de las aguas superficiales. Es cierto que algunos acuíferos se recargan con bastante rapidez, pero el tiempo medio de reciclaje de las aguas subterráneas es 1.400 años, en lugar de tan sólo 20 días para el agua del río. Así que cuando bombeamos fuera de las aguas subterráneas, estamos efectivamente de sacarla de los acuíferos para las generaciones venideras. Se puede evaporar y regresar a la atmósfera con la suficiente rapidez, pero la precipitación resultante (la mayor parte de la cual vuelve a caer en los océanos) puede tardar siglos para recargar los acuíferos una vez que han sido agotadas. Y debido a que el agua en los acuíferos se mueve a través de la Tierra con una lentitud glacial, sus contaminantes siguen acumulándose. A diferencia de los ríos, que a eliminar a sí mismos en los océanos, los acuíferos se convierten en sumideros de contaminantes, década tras década disminuye aún más la cantidad de agua potable que pueden producir para el consumo humano. (Sampat, 2000)

La mayor parte de la investigación relativa a la lixiviación de compuestos nitrogenados inorgánicos se ha centrado sobre el nitrógeno en forma de nitratos (NO₃) y nitritos (NO₂). Los nitratos se han mantenido sin embargo, en la solución del suelo pues no son fijados en el complejo adsorbente y además todos los nitratos simples son muy solubles. La solución de suelo experimenta

movimientos descendentes con el agua de lluvia o de riego, si hay aporte de agua suficiente los nitratos de la solución pueden ser desplazados fuera del alcance de las raíces. La profundidad que alcanzan los nitratos por lixiviación se determina, por la cantidad de agua que pasó por los horizontes de suelo (CPISCA, 2002; Durán et al., 1998).

Estudios realizados estiman que solo el 50 por ciento del nitrógeno aplicado en agricultura es recuperado por el cultivo, el nitrógeno residual está sujeto a pérdidas por varios procesos, uno de los cuales fue el de lixiviado por debajo de la zona de las raíces (Pírela, 1994; Moreno et al., 1996).

La contaminación de aguas subterráneas con nitratos es uno de los mayores problemas a nivel mundial (Weisenburger, 1991; Andriulo et al., 1998; Pacheco et al., 1985).

Altos niveles de nitratos en el suelo pueden conducir a niveles relativamente altos de nitratos en el agua de consumo, lo cual afecta adversamente la salud humana (Picone et al., 2003). Ya que los NO_3 se reducen a NO_2 en el tracto intestinal y estos en la sangre oxidan el hierro de la molécula de hemoglobina, pasando a metahemoglobina, incapaz de transportar oxígeno provocando en infantes la enfermedad conocida como metahemoglobinemia o enfermedad del niño azul.

Aunque la formación de metahemoglobina es un proceso reversible, si puede llegar a provocar la muerte, especialmente en niños (síndrome del bebé azul). La población de alto riesgo son los lactantes que tienen una acidez estomacal baja, lo que permite el crecimiento de ciertos tipos de bacterias en el estómago y los intestinos, y si se alimenta a un niño con fórmula preparada con

agua contaminada con nitratos, estas bacterias pueden convertir los nitratos en nitritos (Leanza et al., 2005).

En virtud de ello, en Etiopía se investigó la capacidad del ácido medio adsorbente de bentonita (arcilla) para la eliminación de iones. La bentonita fue tomada desde el área Gewane, región de Afar, Etiopía Noreste, que se activa con HCl 2M y se caracteriza por espectroscopia FT-IR. El porcentaje de eliminación de iones de nitrato de acuosa solución con esta arcilla estaba decidido a ser el 80 por ciento a una condición óptima de concentración inicial, dosis de adsorbente (bentonita termoactivada), tiempo de contacto y pH determinado. (Bekele, 2014).

5. EL PROBLEMA EN LA REGIÓN CENTROAMERICANA

5.1. Antecedentes

En cuanto a las aguas subterráneas en Centroamérica, ya se manifiestan algunos signos preocupantes determinados por el aumento constante en las concentraciones de nitratos, causadas por la degradación y posterior infiltración de la materia fecal de los líquidos de tanques sépticos y por el uso de fertilizantes nitrogenados. En muchos sitios, los acuíferos ya alcanzan o superan las concentraciones máximas recomendadas por las instituciones de salud para estos parámetros.

El Balance Hídrico Nacional de Costa Rica revela que existen zonas con altos contenidos de hierro y magnesio, particularmente en las cuencas de los ríos Sixaola, Guácimo y Matina. Además, hay zonas costeras con aguas duras que, aunque no sobrepasan los valores permisibles, se caracterizan por ser incrustantes. Entre estas zonas, se pueden citar Nicoya, Nandayure, Santa Cruz, ciudad Neilly, Limón y Puntarenas Centro. En algunos acueductos de la meseta central, existen aguas con poca dureza o blandas, con características corrosivas.

Lo anterior pone de manifiesto la vulnerabilidad a la que están expuestos los acuíferos del país que abastecen las ciudades más importantes, como es el caso de los acuíferos Barba y Colima Superior, de los cuales depende el abastecimiento del 20 por ciento de la población nacional. (GWE, ZONAF, BCIE, UE, 2011).

Actualmente, no se encontró investigación de ningún tipo en cuanto a la remoción de nitratos del agua potable por métodos no convencionales.

5.2. Hechos en Guatemala

Asimismo, se ha hecho evidente el serio problema de contaminación de las fuentes superficiales y subterráneas que abastecen a la ciudad. Análisis del agua en los ríos Tacó y Shusho mostraron la dureza, alta presencia de nitratos y contaminación por coliformes fecales en los mismos (MARN 2007). Una posible fuente de contaminación en aguas subterráneas puede ser el lixiviado de contaminantes al subsuelo por medio de residuos en su superficie como en el caso de los basureros (relleno sanitario de la zona 3) o bien producto de la infiltración de aguas residuales domésticas en pozos de absorción en obras no conectadas a la red de alcantarillado que utilizan sistemas de inyección (e.g. fosas sépticas y pozos de absorción).

Los valores críticos del agua subterránea para el consumo humano se encuentran en los nitratos, pues el 87,5 por ciento de los pozos muestreados en Chiquimula presentó concentraciones que afectan la salud de los consumidores, es decir, que sobrepasaron el límite máximo permisible. (Girón, 2011).

La creciente contaminación de los cuerpos de agua superficial y subterránea es uno de los principales problemas para el subsector de agua y saneamiento, pues impone el reto de contar con un sistema adecuado de saneamiento, lo que implicará fuertes compromisos financieros.

En la ciudad de Guatemala los nitratos sobrepasan los límites máximos permisibles según pruebas de laboratorio realizados en aguas subterráneas

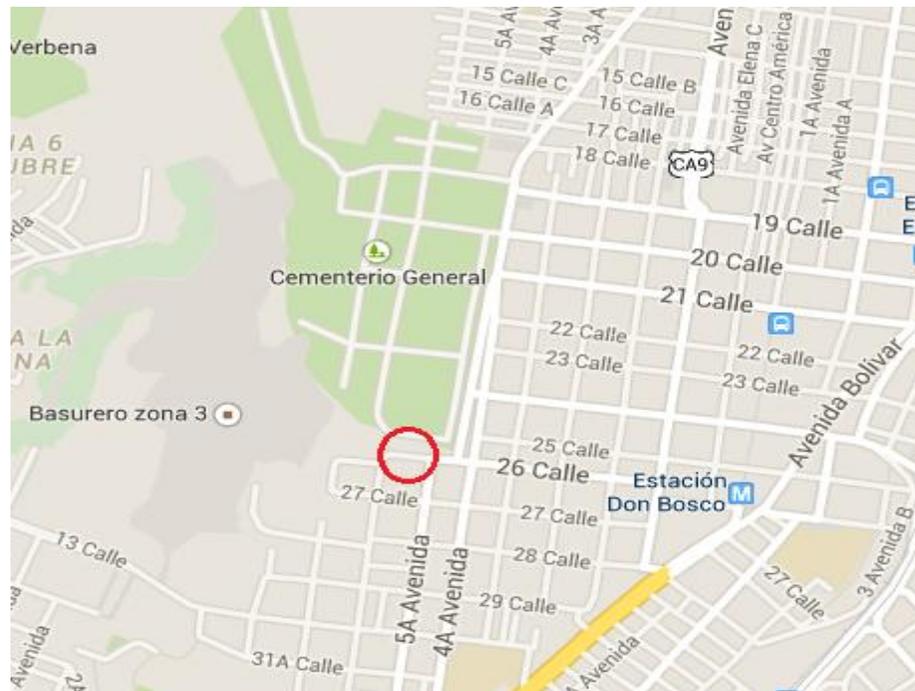
procedentes de pozos administrados por la empresa que distribuye agua en la ciudad de Guatemala, EMPAGUA ubicados en la zona 3.

6. DESCRIPCIÓN Y OBJETO DEL ESTUDIO

6.1. Ubicación del pozo para estudio

Como se mencionó anteriormente, para esta investigación se utilizará agua con un contenido alto de nitratos. Se extraerá del pozo de EMPAGUA que se encuentra en el centro de Salud ubicado en la 26 calle 6-43, zona 3. Dicho pozo está ubicado al lado del Cementerio General en la ciudad de Guatemala del departamento de Guatemala, Guatemala. Sus coordenadas geográficas son: latitud $14^{\circ} 37' 32''$ N y longitud $90^{\circ} 31' 43''$ O. El acceso se puede realizar a pie o en vehículo por la avenida Cementerio del General.

Figura 5. Ubicación pozo



Fuente: Google maps.

7. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

7.1. Búsqueda de información

Se subdivide en dos subáreas de investigación. Cada una comprendió la búsqueda de la información necesaria para conocer los diferentes aspectos teórico-prácticos relacionados con el estudio.

1. Relacionado al Marco Teórico
2. Búsqueda de la información de los medios de remoción

En relación al primero, este a la vez se puede dividir en dos subdivisiones, la información de cómo se hace la estructura del marco lógico y por otro lado, la información de cada componente.

- Nitratos, información básica, el ciclo del nitrógeno, su presencia en la naturaleza, su importancia para la salud.
- Relación de los nitratos con la metahemoglobinemia.
- Método para determinar la concentración de nitratos en el agua.

Asimismo la etapa comprendió también:

- La preparación del procedimiento de investigación.

- Elaboración con ayuda del asesor el muestreo calendario de actividades y tipos de análisis a efectuar.

Respecto del segundo punto se puede subdividir en dos partes, la primera es sobre la forma de remoción, sus componentes y la segunda la información del medio de remoción como ejemplo, ¿qué es?, ¿dónde se consigue en el territorio nacional?, sus propiedades e información de las experiencias de otros investigadores en experimentos semejantes.

7.2. Recolección de muestras de agua

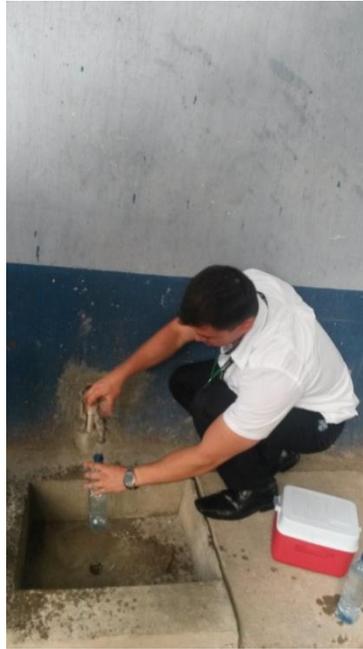
La toma de muestras de agua para llevar a cabo las pruebas se realizó a lo largo del desarrollo del estudio, y durante las pruebas tres veces por semana. No se requirió de ningún orden debido a que el contenido de nitratos no varía con respecto al tiempo. La toma de muestras de agua se realizó en dos puntos: a la salida del pozo y posterior al tanque de almacenamiento y dosificación de cloro.

Figura 6. Lugar de toma de muestras 1



Fuente: elaboración propia.

Figura 7. Lugar de toma de muestras 2



Fuente: elaboración propia.

7.3. Tipo de muestras

Las muestras recolectadas son muestras simples. Esto quiere decir, que solamente se tomó una muestra puntual para la medición de parámetros antes y después de las pruebas. En la foto de la izquierda se muestra la válvula para la obtención de agua directamente del pozo, en la derecha se obtiene muestra posterior al tanque de almacenamiento.

7.4. Número de muestras

Para determinar el número de muestras a tomar, se utilizó el método 1060B indicado en Métodos Normalizados para el Análisis de Agua Potable y Residual.

Se utilizaron las curvas de niveles de confianza establecidos a partir de la siguiente fórmula. (Standard methods for the examination of water and wastewater, 2002)

$$N \geq \left(\frac{ts}{U}\right)^2$$

Donde:

N= número de muestras

t= t para un nivel de confianza determinado

s= desviación estándar global

U= nivel de confianza aceptable

Para una desviación estándar s de 0,020 y un nivel de confianza U de 0,015 se obtiene un valor de 1,33 para la relación s/U. Con base en este resultado se realizó para un nivel de confianza del 95 por ciento y se determinó que el número de pruebas a realizar debe ser como mínimo 10.

7.5. Adquisición de medio de remoción

En esta fase se realizó la adquisición de la bentonita como medio de remoción de nitratos en el agua procedente del pozo en análisis, esto comprendió lo siguiente:

Obtención de 100 libras de bentonita procedente de la aldea Los Cimientos en el departamento de Chiquimula, con los resultados del análisis por el Ministerio de Energía y Minas.

Transporte, termoactivación y preparación de la bentonita

- Diluir el ácido clorhídrico a dos molar con agua destilada.
- Realizar la termoactivación de la bentonita al colocar un 50 mL por 100 gramos de bentonita y agitar a 250 RPM a una temperatura constante de 80 grados Celsius durante 3 horas.
- Secar la mezcla a 105 grados Celsius.
- Extraer la muestra y triturarla con mortero y pistilo y guardarla para su utilización.

Una vez obtenidos los materiales se procedió a efectuar las pruebas en los modelos experimentales, los cuales fueron dos; el primero en una columna de contacto y el segundo consistió en varias pruebas de jarras con distintas dosis, tiempos de contacto y velocidades de agitación.

7.6. Selección del sitio para pruebas

Comprendió la selección del sitio donde el modelo de investigación había de ser instalado. Esta fase tuvo por objeto seleccionar el lugar en donde se habrían de correr las pruebas, inicialmente se propuso que el sitio se encontrara vecino al pozo del cual se obtiene el agua en cuestión. Sin embargo, se concluyó en que resultaba más práctico transportar el agua extraída para efectuar las pruebas de remoción de manera inmediata.

Entre otras se consideró el espacio para la colocación del sistema y la seguridad para las pruebas. En consulta realizada con el asesor del estudio se estableció como sitio final el Laboratorio de Química y Microbiología Dra. Alba Tabarini de Abreu.

Una vez seleccionado el sitio y preparado el lugar con los materiales se procedió con lo siguiente:

- Construcción e instalación del modelo experimental de investigación en el lugar seleccionado.
- Comprobación de funcionamiento del modelo experimental previo a la operación definitiva.

7.7. Análisis practicados

Para la verificación de la hipótesis planteada y llevar a cabo la comprobación de la remoción de nitratos por medio de bentonita (arcilla tipo montmorillonita) se hizo uso del Laboratorio de Química y Microbiología Sanitaria de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria –ERIS- ubicado en el Centro de Investigaciones de Ingeniería, en donde se practicaron los siguientes análisis:

- Nitratos
- pH
- Turbiedad
- Temperatura

7.8. Observaciones relevantes

La concentración de nitratos se determinó mediante un método estándar llamado "Método de detección espectrofotométrica por reducción de cadmio". Este método sigue exactamente el procedimiento que se describe en los métodos estándar para el examen de agua potable y residual. Se realizó

haciendo uso de un espectrofotómetro HACH DR/2010 siguiendo las instrucciones indicadas en el manual (método 8039). En él se verificó la concentración de nitratos del agua extraída del pozo.

La concentración inicial en el agua extraída del pozo fue determinada por dilución al 50 por ciento con agua destilada debido a que el resultado obtenido se salía del límite del espectrofotómetro utilizado.

En un principio se realizó una prueba piloto colocando 2,50 gramos de bentonita termoactivada dentro de un *beaker* de 100 mL con 50 mL de agua y se puso a agitar a una velocidad de 250 revoluciones por minuto a una temperatura de 30 °C durante 90 minutos de contacto. Posteriormente cada muestra se coló por medio de papel filtro con una bomba de vacío con el fin de eliminar los coloides presentes para no afectar los resultados en la medición de parámetros. Se tomaron las muestras al principio y final de cada prueba efectuada, lo que permitió establecer el porcentaje de remoción y el comportamiento de esta a distintas condiciones de cantidad de medio, velocidad de agitación y tiempo de contacto.

En virtud de lo anterior se planteó el segundo modelo de remoción para hacer trabajar el medio filtrante a distintos tiempos y velocidades de agitación. A raíz de las investigaciones realizadas en el segundo modelo de filtración propuesto se observó una mejoría en la remoción por lo que se decidió evaluar si mejoraba la eficiencia agregando sulfato de aluminio lo cual no fue satisfactorio.

7.9. Fase de investigación

Esta fase es la coincidencia de las tres fases anteriores, una vez hechas las investigaciones, elaborado el diseño, obtenido el medio filtrante, el medio de confinamiento de la bentonita y construido el modelo en el sitio seleccionado se procedió a la verificación de la hipótesis haciendo uso de un programa de monitoreos y análisis que incluyó lo siguiente:

- Evaluación de las características físico-químicas del agua cruda que ingreso al modelo experimental, en diferentes fechas.
- Evaluación de las características físico-químicas del efluente que sale del modelo experimental estudiado, durante la etapa de pruebas. En esta fase se hizo uso de un espectrofotómetro HACH para determinar la concentración de nitratos tanto a la entrada y salida de los filtros con el objeto de establecer el porcentaje de remoción.
- Monitoreo de la remoción de nitratos lo cual llevo a un segundo diseño como se verá más adelante.
- Recopilación de datos de la muestra mezclada de cada dosis.

7.10. Fase final

Una vez recopilada la información de campo se procedió a la tabulación de los datos obtenidos y al análisis de los mismos para la obtención de las conclusiones del estudio realizado.

Para facilitar la interpretación de los resultados obtenidos se realizaron gráficas con los datos obtenidos tales, estas se muestran en la sección de resultados como:

- Remoción de nitratos *versus* tiempo de filtrado
- De variación de otros parámetros *versus* tiempo de filtrado
- Remoción de Nitratos *versus* cantidad de bentonita agregada

De los datos obtenidos, ordenados y tabulados se realizaron las interpretaciones para establecer lo siguiente:

- Obtener conclusiones del proceso de investigación realizado.
- Obtener parámetros para el diseño de estructuras para reducir la cantidad de nitratos en caudales mayores.
- Retroalimentación de los supuestos de investigación planteados.
- Comparar los resultados obtenidos con las técnicas de remoción realizadas para establecer criterios de selección de tecnologías a fin de seleccionar la más eficiente, práctica y accesible para su aplicación en campo.
- Establecer recomendaciones que permitan mejorar el proceso de investigación o su aplicabilidad a condiciones reales.

- Elaborar un documento con los hallazgos realizados y solución de problemas relacionados con la concentración de nitratos en agua de consumo y que pueda servir como criterios de prevención de los efectos de tal anomalía en el agua de consumo.

8. MODELOS EXPERIMENTALES USADOS EN LA INVESTIGACIÓN

8.1. Planteamiento del modelo experimental

Para el proceso de investigación se desarrollaron dos modelos experimentales para la remoción de nitratos en los que se investigó el comportamiento del medio propuesto:

Una columna de filtración realizada con bentonita como medio de remoción por adsorción y arena de río y gravilla como lechos de confinamiento.

Prueba de jarras con bentonita como medio de remoción evaluado a distintas velocidades y tiempos de agitación.

En el diseño de cada modelo se analizaron las propiedades físicas de los medios utilizados (ver anexo), y se comprobó que debido a la granulometría del medio que este no era apto para utilizarse como material filtrante.

Figura 1. **Modelo Experimental 1, columna para filtración rápida**



Fuente: elaboración propia.

El primer modelo desarrollado fue una columna de remoción por adsorción que asemeja una columna filtración rápida, el segundo modelo consistió en un dispositivo en el cual se realiza agitación mecánica por mezcla rápida (200 RPM) seguido por un tiempo de decantación. Cada modelo experimental fue evaluado en su comportamiento hidráulico así como las propiedades de remoción.

8.2. Preparación del ácido clorhídrico y del medio de remoción

8.2.1. Preparación del ácido clorhídrico comercial a HCl (2M)

El ácido clorhídrico se encuentra comercialmente en una concentración al 32 por ciento. Para efectos de esta investigación se realizó una dilución de este para alcanzar una concentración de dos moles por litro (2M), ya que en estas condiciones se han mejorado las propiedades de la bentonita como medio de intercambio. (Bekele, 2014).

La fórmula de molaridad es:

$$M=(g/PM)/V(L)$$

Para preparar 1L, entonces:

$$\% \text{ molaridad} = \frac{m \text{ soluto}}{m \text{ solución}} * 32\%$$

$$\% \text{ molaridad} = 1.157 \text{ Kg} * 32\% = 370.24 \text{ g/L}$$

Número de átomos por masa atómica

Masa atómica hidrógeno 1 x 1.0079 Daltons

Masa atómica cloro 1 x 35.4530 Daltons

36.4609 g/mol

$$2=(g/36,46)/1$$

$$g=2*36,46=72,92\text{g HCl}$$

Si la disolución de HCl de la que partes es de 32 %, significa que:

$$370.24 \text{ g/L} \text{-----} 1 \text{ mol}$$

$$X \text{ -----} 36.4609 \text{ g}$$

$$X=370,24/36,4609=10,1546 \text{ moles de HCl por litro}$$

$$C1V1=C2V2$$

De donde:

$$10,1546 \times V1 = 2M \times 3,78 \text{ Litros}$$

$$V1 = 0,74449 \text{ mL/Galón}$$

Para preparar la disolución se toman 750 mL de la disolución 32 % y se lleva hasta 1 galón con agua destilada en un matraz aforado.

Figura 2. **Ácido clorhídrico comercial al 32 %**



Fuente: elaboración propia.

Figura 3. **Ácido y protección utilizada**



Fuente: elaboración propia.

El medio de remoción seleccionado es una bentonita tipo montmorillonita de calcio extraída de la aldea Los Cimientos del departamento de Chiquimula pulverizada a un mesh 325. Esto se realizó por encontrarse, aunque poca; información sobre las propiedades de remoción en un medio como la bentonita por intercambio iónico.

Acerca de este medio, en ningún documento consultado se menciona las condiciones bajo las cuales se realiza la preparación del medio, o se describe el proceso de remoción, no se mencionan los resultados y/o posibles efectos secundarios de dicho proceso, razón por la que, en aras de conocer parámetros que permitan el diseño de un mecanismo de des nitrificación del agua para el consumo humano, se consideró estudiar el comportamiento del medio propuesto.

El proceso de preparación de los medios de filtración usados incluyó las siguientes etapas:

- Conseguir el medio de remoción (bentonita).
- Pesar en la tara (50 gramos de material).
- Colocar el material pesado en una jarra de un litro y calentar a 80 °C durante tres horas agitando a 250 RPM.
- Lavar medio filtrante con agua destilada hasta conseguir un pH neutro (ver recomendaciones).
- Colocar en horno y secar a 105 °C.
- Triturar el medio seco con mortero y pistilo.
- Almacenarlo en un lugar seco para su posterior utilización.

Nota:

Es importante mencionar que debido a las limitaciones en cuanto al equipo disponible para la termoactivación de la bentonita, este se realizaba en lotes de 100 gramos cada 3 horas, esto aunado a que no se contaba con equipo adecuado para realizar el lavado previo de la solución previo a secarla en el horno retardaba la tarea de activación. Tomo casi dos semanas preparar 1,36 kilogramos del material.

8.3. Primer modelo experimental

El primer modelo experimental construido consistió en una columna para remoción por adsorción, compuesta por tuberías de entrada, salida y dispositivo para limpieza, de manera que pudiesen ser semejantes al proceso que se sigue en plantas de filtración. Se colocaron dos depósitos para descargar sobre la columna y en el otro para recolección de muestras. Es importante mencionar que tanto el dispositivo como los medios fueron previamente lavados para la remoción de impurezas y desinfectados con una solución de hipoclorito de sodio al 4,5 por ciento en agua por espacios de tiempo superiores a los 45 minutos.

Debido a la granulometría y propiedades físicas de la bentonita y su evaluación bajo distintas condiciones de colocación del lecho, carga hidráulica sobre el medio, entre otras, se concluyó en que el agua pasa a velocidades demasiado lentas (0.2 cm/hora) por lo que se descarta utilizar esta opción como medio de filtración.

8.4. Segundo modelo experimental

Para comprobar la remoción bajo distintas condiciones se desarrolló un segundo modelo experimental que consistió en lo siguiente:

Primero se realizó una prueba piloto en la cual se utilizó un *beaker* con 250 mL del agua extraída del pozo en estudio a la cual se le agregaron 2,50 gramos de bentonita termoactivada y se agitó a una velocidad de 250 revoluciones por minuto por 90 minutos a 30 °C. Posteriormente se dejó sedimentar y el agua se filtró a través de una bomba de vacío con papel filtro.

Se realizaron las mediciones de turbiedad, nitratos, pH respectivamente.

Figura 4. Pruebas en jarras



Fuente: elaboración propia.

Con base a los resultados obtenidos se realizó una segunda prueba, esta vez se realizó una de jarras utilizando con seis vasos de precipitar con 1 litro del

agua extraída del pozo en estudio a la cual se le agregaron distintas dosis de bentonita termoactivada y se agitó a velocidades de 70, 100, 200, 250 revoluciones por minuto por espacios de 30, 60 y 90 minutos a 30 °C.

Posteriormente se dejó sedimentar durante periodos de 10 a 15 minutos y el agua se filtró a través de una bomba de vacío con papel filtro.

Se realizaron las mediciones de turbiedad, nitratos, pH respectivamente.

9. RESULTADOS

Se realizó el análisis de las muestras obtenidas. Los resultados del proceso de investigación se presentan en las tablas siguientes, aquí se incluyen solo los datos más relevantes.

9.1. Datos de pH y nitratos obtenidos en el laboratorio al adicionar bentonita al agua extraída del pozo con 30 minutos de contacto

A partir de la prueba piloto se ensayó con un total de 6 muestras por corrida en las que se adicionó bentonita en diferentes concentraciones realizándose mediciones de pH y nitratos inmediatamente después de realizar el ensayo. Se adicionó cantidades variables de bentonita a seis muestras iniciando con 5 gramos y terminando con 60. Los resultados son los siguientes:

- Estudio especial

Evaluación de la remoción de nitratos en solución acuosa por bentonita modificada

Medición de nitratos el agua procedente del pozo: 164.60 mg/L de NO₃- para todas las pruebas. En la tabla I se muestra el análisis cantidad de bentonita- remoción de nitratos.

Tabla I. Datos de pH y nitratos obtenidos en el laboratorio al adicionar bentonita al agua extraída del pozo con 30 minutos de contacto

No. Jarra	Bentonita TA (gramos)	pH inicial	pH final	Concentración inicial NO3- (mg/L)	Concentración final NO3- (mg/L)	% de remocion
1	5.00	5.91	3.85	164.60	146.70	10.87
2	10.00	5.91	3.62	164.60	102.80	37.55
3	20.00	5.91	3.57	164.60	84.80	48.48
4	30.00	5.91	3.57	164.60	121.70	26.06
5	40.00	5.91	3.53	164.60	126.90	22.90
6	60.00	5.91	3.55	164.60	151.10	8.20

Fuente: elaboración propia.

9.2. Datos de pH y nitratos obtenidos en el laboratorio con 60 minutos de contacto

Una vez observados los resultados se realizó una prueba similar adicionando cantidades variables de bentonita a seis muestras iniciando con 5 gramos y terminando con 60, con la diferencia de que ahora el tiempo de agitación se incrementó a 60 minutos. Los resultados son los siguientes:

- Análisis cantidad de bentonita-remoción de nitratos
- 60 minutos de agitación a 200 revoluciones por minuto

Tabla II. Datos de pH y nitratos obtenidos en el laboratorio al adicionar bentonita al agua extraída del pozo con 60 minutos de contacto

No. Jarra	Bentonita TA (gramos)	pH inicial	pH final	Concentración inicial NO ₃ - (mg/L)	Concentración final NO ₃ - (mg/L)	% de remocion
1	5.00	5.91	4.27	164.60	137.80	16.28
2	10.00	5.91	4.11	164.60	141.30	14.16
3	20.00	5.91	3.77	164.60	119.40	27.46
4	30.00	5.91	3.60	164.60	114.30	30.56
5	40.00	5.91	3.55	164.60	105.80	35.72
6	60.00	5.91	3.50	164.60	148.70	9.66

Fuente: elaboración propia.

9.3. Datos de pH y nitratos obtenidos en el laboratorio con 90 minutos de contacto

Para establecer un rango de resultados y observar su variación con el tiempo se corrió la misma prueba con un tiempo de agitación de 90 minutos. Los resultados son los siguientes:

- Análisis cantidad de bentonita-remoción de nitratos
- 90 minutos de agitación a 200 revoluciones por minuto

Tabla III. Datos de pH y nitratos obtenidos en el laboratorio al adicionar bentonita al agua extraída del pozo con 90 minutos de contacto.

No. Jarra	Bentonita TA (gramos)	pH inicial	pH final	Concentración inicial NO ₃ - (mg/L)	Concentración final NO ₃ - (mg/L)	% de remocion
1	5.00	5.91	4.19	164.60	149.90	8.93
2	10.00	5.91	3.92	164.60	131.00	20.41
3	20.00	5.91	3.68	164.60	107.50	34.69
4	30.00	5.91	3.57	164.60	97.90	40.52
5	40.00	5.91	3.51	164.60	117.40	28.68
6	60.00	5.91	3.51	164.60	144.00	12.52

Fuente: elaboración propia.

Con base a los resultados para 30, 60 y 90 minutos se obtuvo la media, mediana y desviación estándar. Los resultados son los que se muestran a continuación:

- Media, mediana y desviación estándar

-

Tabla IV. Media, mediana y desviación estándar para los datos obtenidos

No. Jarra	Bentonita TA (gramos)	Concentración inicial NO ₃ - (mg/L)	Concentración final NO ₃ - (mg/L) 30 min	Concentración final NO ₃ - (mg/L) 60 min	Concentración final NO ₃ - (mg/L) 90 min	Media	Mediana	Desviación estándar
1	5.00	164.60	146.70	137.80	149.90	144.71	146.70	6.27
2	10.00	164.60	102.80	141.30	131.00	123.92	131.00	19.93
3	20.00	164.60	84.80	119.40	107.50	102.87	107.50	17.58
4	30.00	164.60	121.70	114.30	97.90	110.84	114.30	12.18
5	40.00	164.60	126.90	105.80	117.40	116.38	117.40	10.57
6	60.00	164.60	151.10	148.70	144.00	147.90	148.70	3.61

Fuente: elaboración propia.

9.4. Datos de pH y nitratos obtenidos en el laboratorio con 30 minutos de contacto a 100 rpm

Una vez observado el comportamiento del tiempo de contacto se procedió a evaluar el comportamiento de la remoción con respecto a la velocidad de agitación, así que se realizó una prueba similar a la primera pero esta vez con una velocidad de agitación de 100 revoluciones por minuto. Los resultados obtenidos son los siguientes:

- Análisis cantidad de bentonita-remoción de nitratos
- 30 minutos de agitación a 100 revoluciones por minuto

Tabla V. Datos de pH y nitratos obtenidos en el laboratorio al adicionar bentonita al agua extraída del pozo con 30 minutos de contacto a 100 RPM

No. Jarra	Bentonita TA (gramos)	pH inicial	pH final	Concentración inicial NO ₃ ⁻ (mg/L)	Concentración final NO ₃ ⁻ (mg/L)	% de remocion
1	5.00	5.91	4.36	164.60	141.40	14.09
2	10.00	5.91	4.11	164.60	112.40	31.71
3	20.00	5.91	3.93	164.60	150.10	8.81
4	30.00	5.91	3.82	164.60	132.10	19.74
5	40.00	5.91	3.81	164.60	126.10	23.39
6	60.00	5.91	3.73	164.60	131.10	20.35

Fuente: elaboración propia.

9.5. Datos de pH y nitratos obtenidos en el laboratorio con 30 minutos de contacto a 250 rpm

Una vez obtenido un rango de dosis óptima y para establecer un rango de resultados y observar su variación con la velocidad se corrió una prueba con cuatro muestras a una velocidad de 250 revoluciones por minuto y un tiempo de agitación de 30 minutos. Los resultados son los siguientes:

- Análisis cantidad de bentonita-remoción de nitratos
- 30 minutos de agitación a 250 revoluciones por minuto

Tabla VI. Datos de pH y nitratos obtenidos en el laboratorio al adicionar bentonita al agua extraída del pozo con 30 minutos de contacto a 250 RPM

No. Jarra	Bentonita TA (gramos)	pH inicial	pH final	Concentración inicial NO ₃ - (mg/L)	Concentración final NO ₃ - (mg/L)	% de remocion
1	20.00	5.91	4.05	164.60	112.20	31.83
2	25.00	5.91	4.09	164.60	101.50	38.34
3	30.00	5.91	3.99	164.60	120.00	27.10
4	35.00	5.91	3.92	164.60	150.00	8.87

Fuente: elaboración propia.

9.6. Datos de pH, nitratos y turbiedad obtenidos en el laboratorio con sulfato de aluminio

Una vez obtenido un rango de dosis óptima se realizó una prueba de jarras adicionando sulfato de aluminio en distintas dosis para observar si se podía remover turbiedad. Los resultados son los siguientes:

- Análisis cantidad de sulfato de aluminio-remoción de nitratos
- 20 minutos de agitación a 200 revoluciones por minuto
- 20 minutos de agitación a 70 revoluciones por minuto
- 10 minutos de sedimentación

Tabla VII. Datos de pH y nitratos obtenidos en el laboratorio al adicionar sulfato de aluminio con 20 minutos de contacto y 20 minutos de sedimentación

No. Jarra	Bentonita TA (gramos)	pH inicial	pH final	AlSO4 (gramos)	Concentración inicial NO3- (mg/L)	Concentración final NO3- (mg/L)	% de remocion	Turbiedad (UNT)
1	25.00	5.91	4.01	450.00	164.60	119.60	27.34	495.00
2	25.00	5.91	4.07	500.00	164.60	124.50	24.36	623.00
3	25.00	5.91	3.99	550.00	164.60	118.70	27.89	683.00
4	25.00	5.91	3.92	600.00	164.60	118.30	28.13	244.00
5	25.00	5.91	4.00	650.00	164.60	121.00	26.49	940.00
6	25.00	5.91	3.91	700.00	164.60	110.90	32.62	923.00

Fuente: elaboración propia.

9.7. Datos de pH, nitratos y turbiedad obtenidos en el laboratorio con sulfato de aluminio

Habiendo observado el comportamiento se realizó una prueba variando algunas condiciones. Los resultados son los siguientes:

- Análisis cantidad de sulfato de aluminio-emoción de nitratos
- 1 minuto de agitación a 100 revoluciones por minuto
- 20 minutos de agitación a 60 revoluciones por minuto
- 10 minutos de sedimentación

Tabla VIII. Datos de pH y nitratos obtenidos en el laboratorio al adicionar sulfato de aluminio en prueba de jarras

No. Jarra	Bentonita TA (gramos)	pH inicial	pH final	AlSO4 (gramos)	Concentración inicial NO3- (mg/L)	Concentración final NO3- (mg/L)	% de remocion	Turbiedad (UNT)
1	25.00	5.91	4.01	45.00	164.60	101.80	38.15	490.00
2	25.00	5.91	4.07	50.00	164.60	116.20	29.40	647.00
3	25.00	5.91	3.99	55.00	164.60	102.00	38.03	694.00
4	25.00	5.91	3.92	60.00	164.60	103.70	37.00	342.00
5	25.00	5.91	4.00	65.00	164.60	103.20	37.30	816.00
6	25.00	5.91	3.91	70.00	164.60	101.60	38.27	935.00

Fuente: elaboración propia.

10. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

10.1. Discusión de los resultados obtenidos por medio de agitación del medio de remoción a temperatura constante

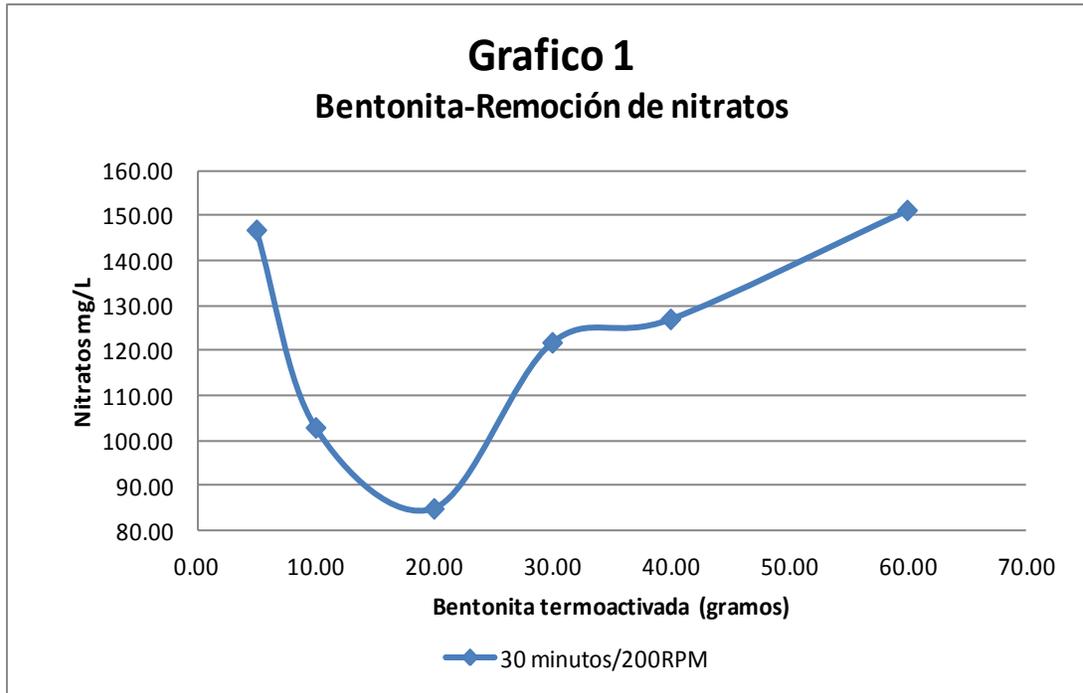
Del estudio de la información suministrada en el capítulo anterior, como resultado del proceso de investigación se establecen los siguientes resultados:

10.2. Efecto del tiempo

El tiempo de contacto es un parámetro importante para determinar el tiempo de equilibrio del proceso de adsorción. Para determinar el tiempo de equilibrio, se utilizaron distintas dosis, desde 5.00-60.00 g de adsorbente (bentonita) se mezcló con agua alta en nitratos (164,60 mg / L) con pH 5.91 a 22,40 ° C.

El experimento se hizo para tiempo de contacto de 30, 60, 90 minutos y el resultado se muestra en las figuras 1-3.

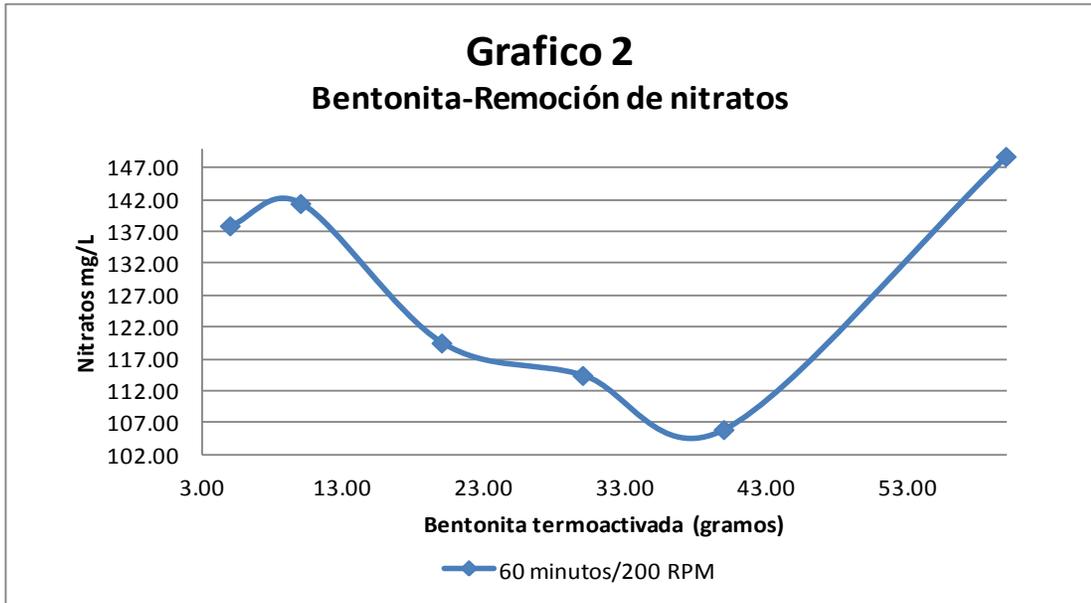
Figura 8. Grafico bentonita-remoción de nitratos



Fuente: elaboración propia.

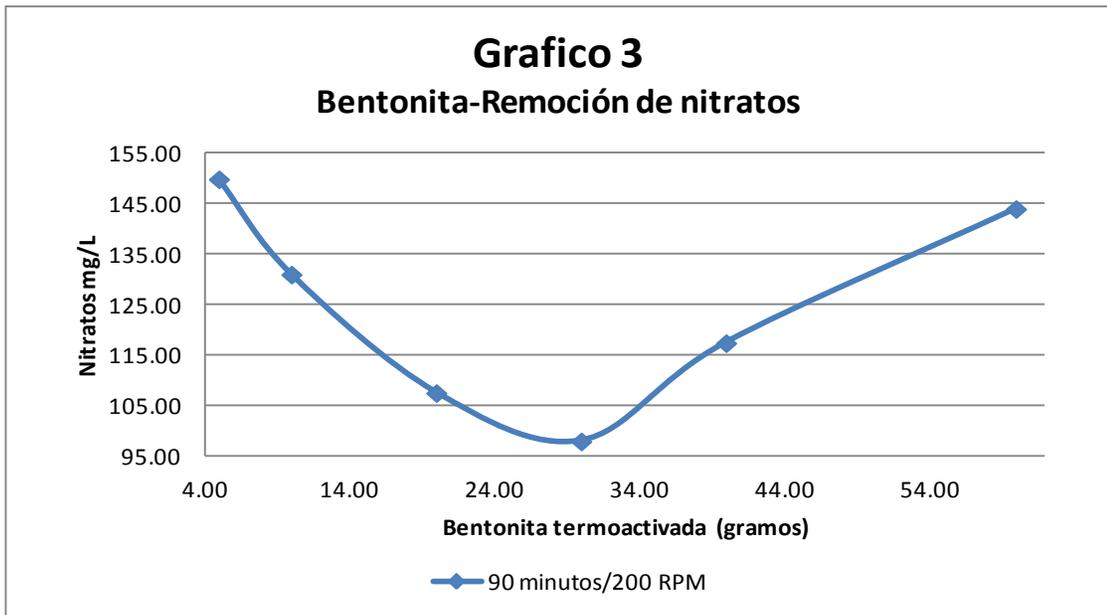
Como se indicó anteriormente se determinó la adsorción del nitrato con base al aumento de bentonita activada al aumentar el tiempo de tratamiento a partir de 30 a 90 min. Sin embargo, el aumento no fue significativo para tiempos de contacto más largos. Esta tendencia podría atribuirse al hecho de que en el inicial tiempo entre 0-30 minutos existe un número de sitios vacantes en el adsorbente, pero después de 30 minutos de estos sitios se llenaron de las moléculas de adsorbato, las cuales en un punto entre 60 y 90 minutos se producen fuerzas repulsivas entre las moléculas del soluto y la fase de expansión de la bentonita se vuelve significativa y comienza a decrecer.

Figura 9. Grafico bentonita-remoción de nitratos



Fuente: elaboración propia.

Figura 10. Grafico bentonita-remoción de nitratos



Fuente: elaboración propia.

10.3. Efecto del pH

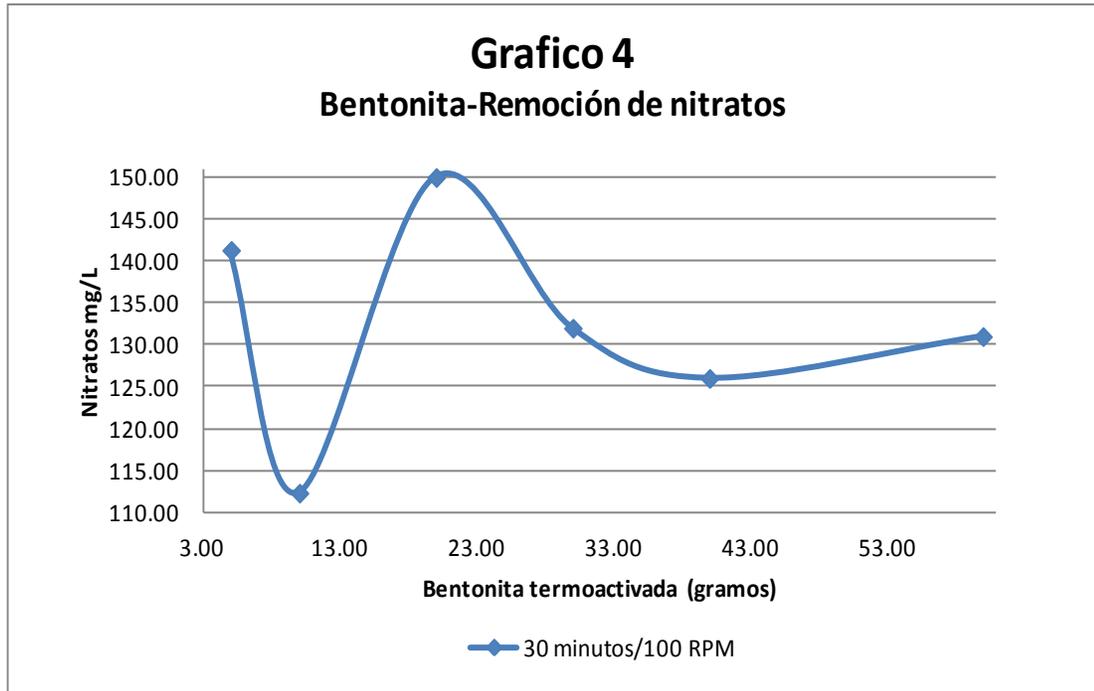
La adsorción de nitratos por bentonita activada se investigó en el intervalo de pH 3-7. El pH se varió debido al pH bajo de la bentonita, ya que fue termoactivada con la solución de ácido, Los resultados muestran que la capacidad de adsorción se mantiene a valores de pH inferiores (medio ácido). Como se observa en todas las tablas el pH se mantuvo en un rango constante a lo largo de todas las pruebas. No se pudo determinar si tiene una tendencia decreciente medida que el pH aumenta.

Esto es porque la bentonita termoactivada posee carga superficial hacia el anión nitrato.

10.4. Efecto de la cantidad de masa adsorbente

Diferentes cantidades (5,00 a 60,00 g) de bentonita se colocaron en vasos de precipitar de 1 L. A continuación, el agua extraída del pozo con pH 5.91 fue añadido a la misma. Después, la mezcla se agitó durante 30-90 minutos a 30 ° C.

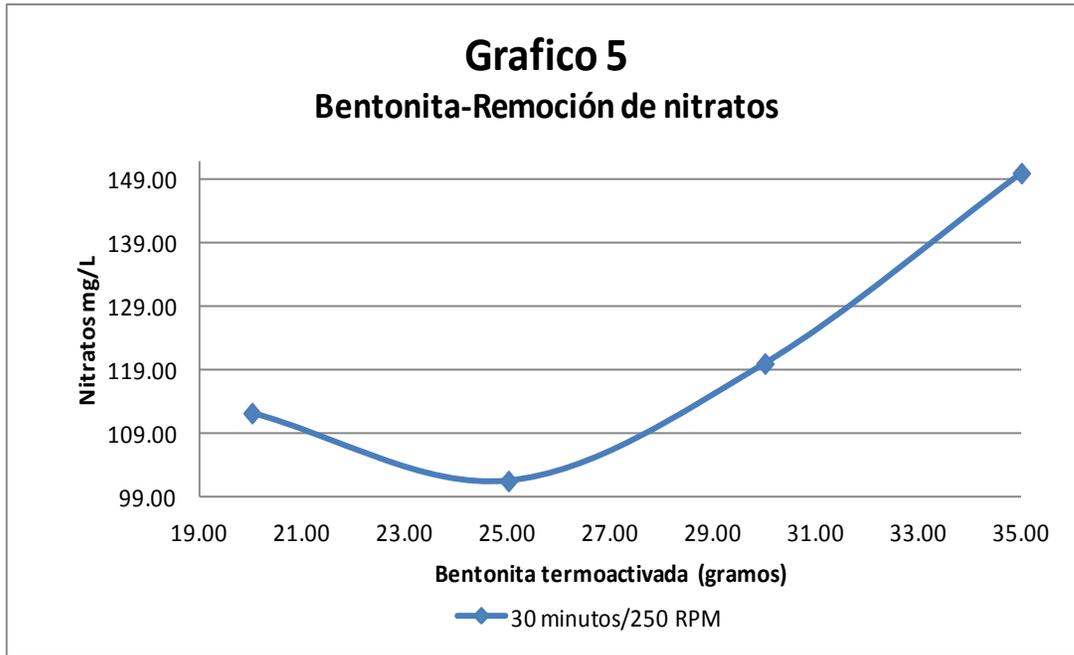
Figura 11. Grafico bentonita-remoción de nitratos



Fuente: elaboración propia.

La dosis óptima se registró en el intervalo de 20-40 gramos, encontrándose la mayor remoción a 20 gramos como se muestra en la tabla I. Posteriormente se procedió a buscar la dosis optima entre el rango anteriormente mencionado encontrándose la remoción óptima con 25 gramos por litro (figura 5). Considerando posibles errores se realizaron 3 mediciones por cada valor encontrado.

Figura 12. Gráfico bentonita-remoción de nitratos



Fuente: elaboración propia.

Como se observa en los gráficos 1-3, la eliminación de nitrato aumentó con aumento de la masa adsorbente. Esto es de esperar porque para una concentración fija de soluto inicial, aumento del total de dosis presentar un área superficial mayor y aumenta el potencial de adsorción. Sin embargo, es observado que a medida que la masa adsorbente aumenta, su porcentaje de remoción decrece posiblemente debido a la superposición de sitios activos y saturación con mayor dosis.

De la información observada en el gráfico 1 se observa:

En la prueba de remoción efectuada se obtuvo la mayor remoción de nitratos (4.80 mg/L) 48,48 %, lo cual es satisfactorio debido a la dificultad que presentan los nitratos para ser removidos. Este aumento se atribuye a un

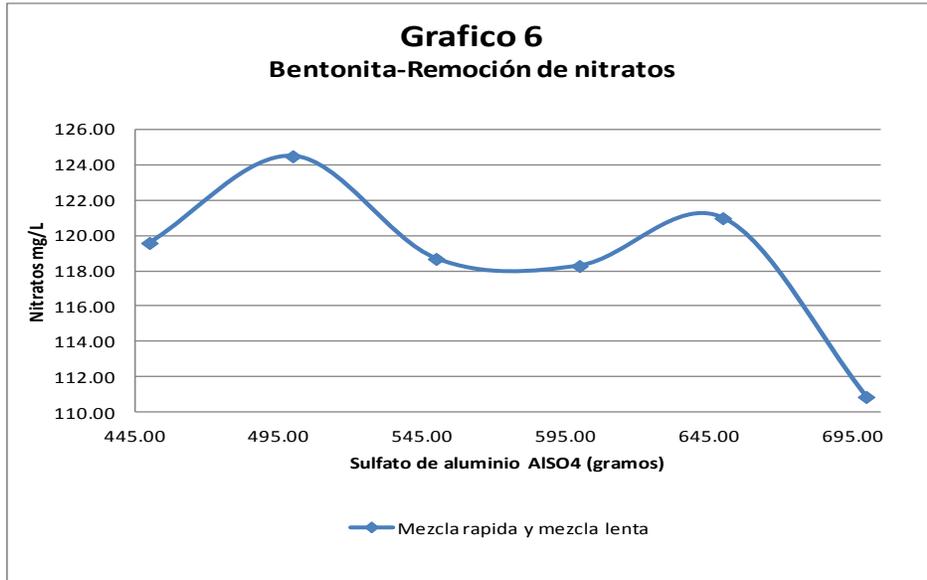
intercambio aniónico por el ion cloro. No se obtuvieron remociones superiores en comparación con las investigaciones realizadas debido a que en dichas pruebas se utilizó una solución de nitratos en agua destilada y el agua de pozo utilizada en esta prueba contiene además otros minerales por lo que existe competencia de iones durante el proceso.

10.5. Resultados de medición utilizando sulfato de aluminio

Se realizó una prueba de jarras con el objeto de encontrar una manera de remover la turbiedad provocada por la bentonita durante la mezcla y aumentar la eficiencia de remoción de nitratos en el agua. Para ello se utilizaron las condiciones óptimas encontradas en las pruebas efectuadas con anterioridad (temperatura, pH, dosis) y se realizaron pruebas utilizando el tiempo de contacto y velocidad de agitación variables para observar su comportamiento, entre ellos se utilizó el tiempo de contacto y velocidad de mezcla óptimo encontrado con la bentonita y después se realizó una prueba de jarras normal (1 minuto de agitación rápida, 20 minutos de agitación lenta y 10 minutos de sedimentación).

Los resultados obtenidos en la tabla VI muestran que no se obtuvo ninguna mejoría. Utilizar una velocidad de agitación rápida (200 RPM) durante 20 minutos rompe el enlace producido por el sulfato de aluminio. En general, los resultados no variaron por lo que no se pudo encontrar una dosis óptima de coagulante que nos represente una mejora en el proceso.

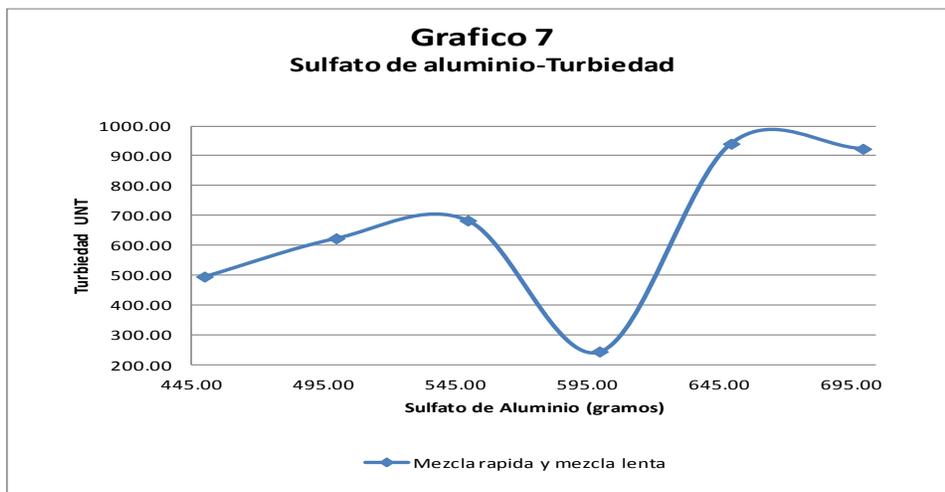
Figura 13. Gráfico bentonita-remoción de nitratos



Fuente: elaboración propia.

Análisis sulfato de aluminio-reducción de turbiedad

Figura 14. Gráfico Turbiedad-sulfato de aluminio

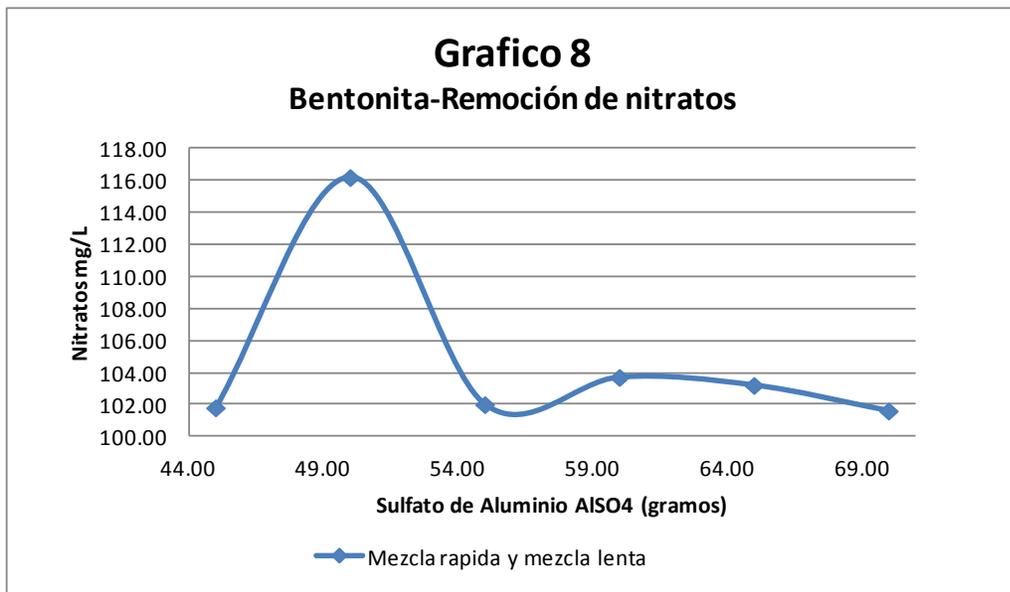


Fuente: elaboración propia.

10.6. Resultados de medición de la turbiedad

En relación con la prueba efectuada como una prueba de jarras normal, los resultados obtenidos tampoco fueron satisfactorios (tabla VII), ya que no se pudo determinar una dosis optima en la remoción de turbiedad ni de nitratos. Esto se debe a que el bajo pH del agua modificado por la bentonita (3.5-4.09) no permite que el sulfato de aluminio pueda actuar sobre las partículas.

Figura 15. Gráfico bentonita-remoción de nitratos



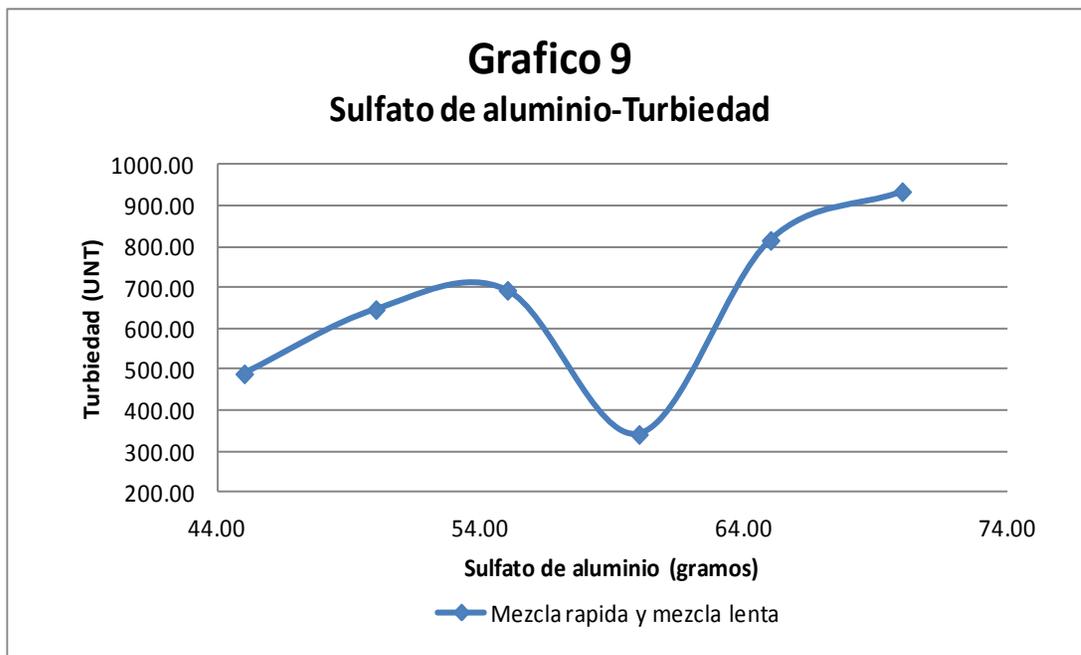
Fuente: elaboración propia.

La turbiedad encontrada después de las pruebas aumenta excesivamente. Aun cuando se efectuaron pruebas anteriores filtrando con medio de arena y grava esta no se redujo debido a la granulometría coloidal de la bentonita. Todas las pruebas de medición de nitratos se efectuaron después de filtrar el agua con papel filtro en la bomba de vacío.

La turbiedad encontrada en las muestras están entre el rango de 244 y 940 UNT. Proviene de aguas subterráneas que no presentan problema de turbiedad, la cual se induce al utilizar la bentonita en la mezcla. Sin embargo y tal como se puede ver en las figuras 8 y 9 los valores son variables pero se debe principalmente a partículas en suspensión de bentonita, que son liberadas por causa de la velocidad de desplazamiento del agua a través del medio utilizado.

**Análisis sulfato de aluminio- Reducción de turbiedad
30 minutos de agitación a 250 revoluciones por minuto**

Figura 16. Grafico bentonita-remoción de nitratos



Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. La hipótesis planteada se comprueba, ya que los resultados obtenidos indican que el cuarenta y ocho punto cuarenta y ocho por ciento (48,48 %) de los iones de nitrato se han removido por adsorción en el agua procedente del pozo en estudio, bajo las condiciones óptimas siguientes:
 - Un tiempo de contacto de treinta minutos.
 - Una concentración de veinticinco gramos de bentonita termoactivada por litro (25,00 g/L),
 - Una temperatura de veintidós punto cuatro grados Celsius (22,40 °C).
2. Entre los parámetros más representativos obtenidos en la caracterización del agua se encuentra el de nitratos, en el cual se observan valores de hasta doscientos uno punto sesenta miligramos por litro (201,60 mg/L), valores superiores al límite máximo permisible según la norma COGUANOR NTG 29001 (50 mg/L) y el parámetro máximo permisible recomendado por la OMS (45 mg/L) se concluye que el agua procedente del pozo no es apta para el consumo humano.

3. Con base a los resultados obtenidos en este estudio se comprueba para el agua procedente del pozo en estudio que la bentonita activada por ácido clorhídrico 2M proveniente de la aldea Los Cimientos es una arcilla que posee buenas propiedades de adsorción y se recomienda como una alternativa para la eliminación de los iones nitrato por medio de intercambio aniónico en agitación mecánica.
4. Debido a los resultados obtenidos en el modelo experimental 1 se realizó un segundo modelo para evaluar la remoción de nitratos por contacto y agitación mecánica.
5. El pH ácido de la solución acuosa interfiere con la eficacia de remoción de turbiedad del sulfato de aluminio debido a que el sulfato de aluminio es efectivo únicamente en un intervalo de pH neutro.

RECOMENDACIONES

1. No se recomienda la utilización de la bentonita (arcilla) como medio filtrante, incluso después de termoactivada, debido a que por su granulometría fina no permite el paso de agua.
2. El utilizar dispositivos de gran capacidad para el pesado y termoactivación de material reduce enormemente los costos de producción del medio de remoción.
3. Para evitar dañar el horno de secado se recomienda lavar la bentonita hasta obtener un pH neutro después de termoactivarla utilizando agua destilada y la bomba de vacío, papel filtro y un mesh de nylon por su resistencia al pH ácido de la solución.
4. Al utilizar sulfato de aluminio para remover turbiedad el agua deberá tener un pH neutro.
5. La bentonita termoactivada no se regenera y el utilizar materiales no diseñados para su activación puede elevar los costos debido al constante reemplazo del equipo.
6. Debe alertarse a la población que el agua no debe utilizarse para el consumo y deben considerarse otras fuentes de provisión alternativa de agua para consumo humano por parte de las instituciones. Al mismo tiempo se deben llevar a cabo controles en la población que utiliza este

recurso, para determinar si no existen casos de metahemoglobinemia en infantes.

7. El fácil control de la composición de las arcillas aniónicas y la posibilidad de aumentar el área superficial y el volumen interlaminar, con la elección apropiada de los cationes intercalados, permiten un óptimo ajuste de sus propiedades, posibilitando sintetizar un material de acuerdo con la finalidad que se desea.
8. Se recomienda realizar una sistematización del proceso productivo de bentonita termoactivada, incluyendo costos de inversión y de producto terminado y realizar un análisis comparativo contra los costos de métodos de remoción de nitratos comerciales (resinas, osmosis inversa, etc.) para establecer la viabilidad económica a nivel industrial.
9. Es importante el estudio de remoción de nitratos utilizando arcilla férrica como otra alternativa a este.

BIBLIOGRAFÍA

1. ARBOLEDA VALENCIA, Jorge. *Teoría y práctica de la purificación del agua*. Colombia: ACODAL. 2010. 210. p.
2. BEKELE, W. E. *Removal of nitrate ion from aqueous solution*. International Journal of Research in Pharmacy and Chemistry Guatemala. 2014. 10. p.
3. Ciclo de nitrógeno. [en línea] <<http://www.ipcbee.com/vol1733-L30009.pdf>>. [Consulta: 24 de enero de 2013.]
4. FOSTER, Stephen, VENTURA, Miguel, VENTURA, Ricardo. *Contaminación de agua subterráneas*. OMS, CEPIS, Lima, Perú. 1987.
5. GIRON, D. E. *Evaluación y mapeo de la cantidad de agua y nivel freático en pozos artesanales para abastecimiento humano y su posible relación con la red hidrológica en el casco urbano de la ciudad de Chiquimula*. Guatemala: Editorial Universitaria. 2011.
6. GWD, ZONAF, BCIE, UE. *Situación de los recursos hídricos en Centroamérica*. 2011. 147 p.
7. KOROM, S. Natural denitrification in the saturated zone: a review. *Wat Resour*. 1992.

8. LEVY, E. *Diagnóstico mineralógico de la región del trifinio*. Guatemala: OEA. 1987.
9. MÉNDEZ, A. [en línea] <http://quimica.laguia2000.com/>. Retrieved, from <http://quimica.laguia2000.com/reacciones-quimicas/nitratos>. [Consulta: 28 de septiembre de 2010.]
10. Nanofiltration efficiency in nitrate removal from groundwater. *A semiindustrial case study*. [en línea] <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/mexico26/i-026.pdf> [Consulta septiembre de 2011.]
11. Nitrate removal using natural clays modified by acid thermoactivation [en línea] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016943320601590X>. [Consulta: septiembre de 2013.]
12. Norma NTG 29001:99. *Norma para agua potable* Guatemala.
13. PELCZA, Reid Chan. *Microbiología sanitaria*. 4a ed. México: McGraw-Hill, 1982.
14. PALACIOS, L. A. *Nitratos y nitritos*. Xalapa. 1997.
15. QUINTANA, P., et al. Nitrate removal using natural clays modified by acid thermoactivation. Science Direct, 2007.
16. SAMPAT, P. *Groundwater shock. The polluting of the world's major freshwater stores*. World Watch Magazine. 2000.

17. T., H. *Isotopic and chemical aspects of nitrate in the ground water of the Springbook Flats, S. A.* Vol. 11. 1985

APÉNDICES

Apéndice 1. **Secuencia fotográfica del proceso de preparación del medio filtrante (bentonita)**

Figura 17. Bentonita mesh 325 extraída de la aldea Los Cimientos



Fuente: elaboración propia.

Figura 18. Pesado de la bentonita a ser termoactivada



Fuente: elaboración propia.

Figura 19. Colocado de la cantidad de medio a preparar en vaso de precipitar y estufa para calentado y agitación



Fuente: elaboración propia.

Figura 20. Calentado y agitado durante 3 horas a 80 °C (se medía la temperatura con termómetro de mercurio constantemente)



Fuente: elaboración propia.

Figura 21. Medio activado



Fuente: elaboración propia.

Figura 22. Horno de secado



Fuente: elaboración propia.

Figura 23. Medio seco



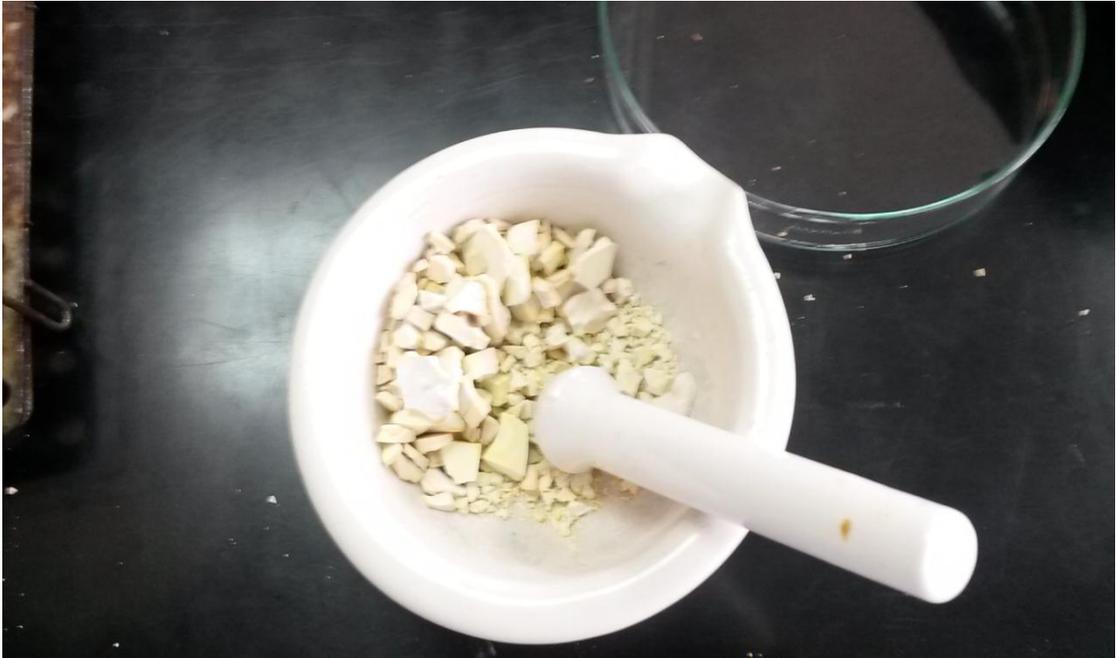
Fuente: elaboración propia.

Figura 24. Medio listo para ser pulverizado



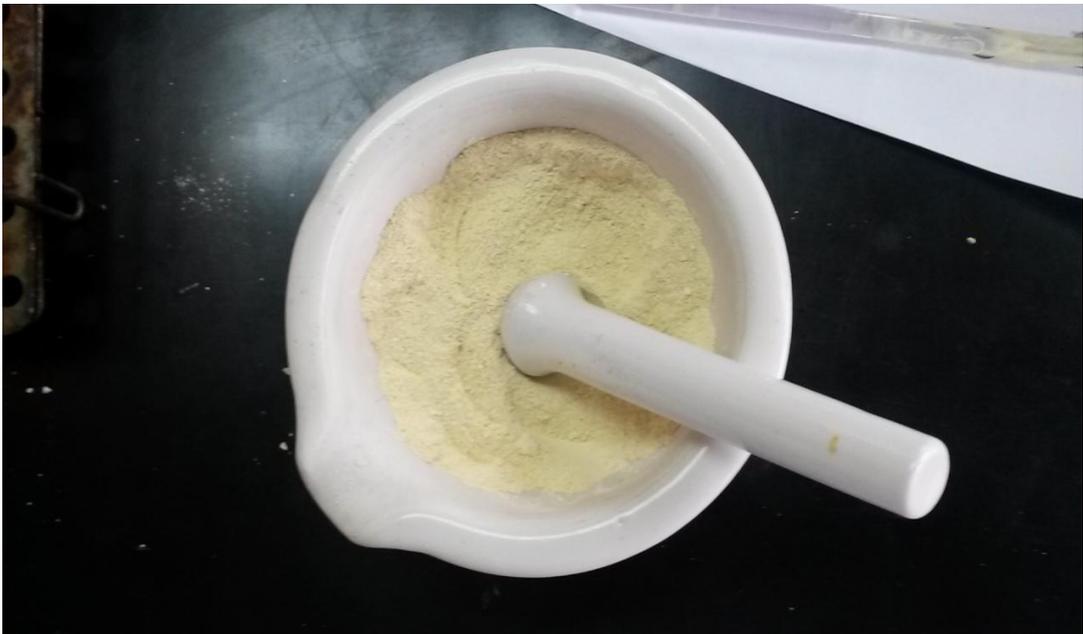
Fuente: elaboración propia.

Figura 25. Secuencia de pulverización con mortero y pistilo



Fuente: elaboración propia.

Figura 26. Medio pulverizado



Fuente: elaboración propia.

Secuencia fotográfica de construcción modelo experimental #1

Figura 27. Vista general del Modelo Experimental #1 Columna de acrílico (en construcción)



Fuente: elaboración propia.

Figura 28. Vista General del Modelo Experimental #1. Columna de acrílico (en desinfección)



Fuente: elaboración propia.

Este modelo se diseñó para que la columna de remoción trabajara como un filtro con tasa de filtración rápida (10 a 180 m³/m²-día). Se colocaron tres capas en la columna únicamente con el fin de confinar la bentonita termoactivada; grava (10-15 cm), arena (10-15 cm) y medio filtrante (variable), se evaluó su comportamiento por un periodo de una semana.

Figura 29. Preparación de la columna



Fuente: elaboración propia.

Figura 30. Colocación de los materiales



Fuente: elaboración propia.

Figura 31. Construcción de Estructura de Soporte de Filtros



Fuente: elaboración propia.

Figura 32. Prueba en acción



Fuente: elaboración propia.

Figura 33. Cambios de confinamiento de bentonita en columna de contacto



Fuente: elaboración propia.

Figura 34. Variación de la colocación de los medios para su evaluación



Fuente: elaboración propia.

Secuencia fotográfica de construcción modelo experimental #2

Figura 35. Vista general del modelo piloto previo al modelo experimental #2



Fuente: elaboración propia.

Figura 36. Sedimentación



Fuente: elaboración propia.

Figura 37. Reactivo utilizado



Fuente: elaboración propia.

Figura 38. Pruebas para análisis



Fuente: elaboración propia.

Figura 39. Espectrofotómetro HACH



Fuente: elaboración propia.

Figura 40. Distintas dosis de bentonita termoactivada modelo experimental #2



Fuente: elaboración propia.

Figura 41. Prueba de jarras para determinar concentración óptima



Fuente: elaboración propia.

Figura 42. Pruebas para análisis



Fuente: elaboración propia.

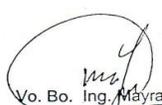
Figura 43. Espectrofotómetro HACH



Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1. Resultados análisis bentonita

LABORATORIO TECNICO RESULTADOS DE ANALISIS	PAGINA 1 DE (1) LAB-REP-900-C4 ORDEN L- 381-04 NUM. Guatemala, 13-08-04				
MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS GUATEMALA, C. A.					
MUESTRA: Bentonita PRESENTADA POR: Ing. Oscar Rosal RESPONSABLE DEL MUESTREO: Desconocido PROCEDENCIA: Departamento de Desarrollo Minero, Dirección General de Minería LOCALIZACION: Edificio MEM FECHA DE MUESTREO: 28-07-04 FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA: 02-08-04 FECHA DE ANALISIS: del 04 al 13-08-04 PRECIO DE ANALISIS: \$ 63.00 ANALISTA: Byron Rosales					
IDENTIFICACION DE LA MUESTRA	CALCIO	MAGNESIO	SILICIO	ALUMINIO	HUMEDAD
	% Ca	% Mg	% Si	% Al	% H ₂ O
Bentonita	0.70	1.34	29.06	5.67	13.96
Observaciones: Técnica de análisis: Espectrometría de absorción atómica para los elementos químicos y gravimetría para la humedad. Los resultados de los elementos se expresan en forma elemental y en porcentaje en peso del elemento con respecto a la muestra original. El resultado de la humedad fue determinado a 110°C y se expresa en porcentaje en peso de agua. Los resultados son válidos únicamente para la porción de muestra presentada a este laboratorio. A solicitud del cliente el resultado elemental de cada elemento por estequiometria se traslada a su respectivo óxido, dichos valores se presentan en la siguiente tabla:					
IDENTIFICACION DE LA MUESTRA	CALCIO	MAGNESIO	SILICIO	ALUMINIO	
	%CaO	%MgO	%SiO ₂	%Al ₂ O ₃	
Bentonita	0.98	2.22	62.17	10.71	
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  Ing. Pedro Lorenzo SECCION DE MINERALES </div> <div style="text-align: center;">  </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  Vo. Bo. Ing. Mayra Villatoro JEFE LABORATORIO TECNICO </div> <div style="text-align: center;">  </div> </div>					
Este presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin la autorización del Laboratorio Técnico					

Anexo 2. Informe pozo EMPAGUA



DIRECCIÓN FUENTES DE PRODUCCIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA
UNIDAD SISTEMA DE POZOS
Empresa Municipal de Agua de la Ciudad de Guatemala
Municipalidad de Guatemala

Of. 057-2014

MARZO 20, 2014

Ingeniero
Edwin Josué Espina Sandoval
Unidad de Evaluación de Proyectos de Agua
y Alcantarillado
Empagua

Ingeniero Espina:

Por este medio brindo la información solicitada a esta Jefatura:

El caudal de producción del pozo Centro de Salud, zona 3 es de 5.699 mts³/hora.

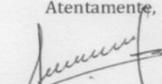
- El pozo posee equipo sumergible con motor Franklin de 7.5 Hp, 230 voltios, 3 fases, 3450 rpm, con bomba Unitra HMX 774 colocada a 360 pies.
- El tanque de almacenamiento al cual abastece, es un tanque metálico ubicado en las mismas instalaciones del pozo.
- El encargado de las instalaciones del pozo es el señor Luis Alberto Lobos.

La Dirección de Administración de la Red cuenta con la información detallada de las zonas a las que abastece el pozo, por lo que recomiendo dirigirse a esa Dirección.

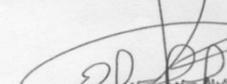
Así mismo se le informa que al momento de realizar la visita al pozo, debe comunicarse con el suscrito o con el señor Luis Lobos para la autorización respectiva.

Sin otro particular, me suscribo de usted,

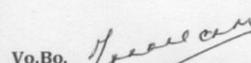
Atentamente,


Luis Augusto Garcia Beltrán
Jefe Sistemas de Pozos




Vo.Bo. Daniel Folgar Estrada
Subdirector de Agua Subterránea




Vo.Bo. Teodoro de J. Cabrera
Director Fuentes Producción
de Agua Subterránea



8^a avenida 1-27, zona 4, Edificio Mini, Quinto Nivel, Aja Norte

Teléfono directo: 23903702 – Planta Telefónica: 22858700

www.muniguate.com



Anexo 3. Resultados promedio análisis físicos químicos y bacteriológicos

POZO CENTRO DE SALUD ZONA 3	MINIMO	MAXIMO	PROMEDIO
ASPECTO			
COLOR unidades	1.00	9.00	1.57
TURBIEDAD UTN	0.14	22.50	1.99
OLOR			
POTENCIAL DE HIDROGENO (Ph) unidades	1.60	7.08	6.21
TEMPERATURA °C	22.50	26.80	25.07
SOLIDOS TOTALES mg/l	291.00	487.00	323.07
SOLIDOS VOLATILES mg/L	2.00	109.00	17.57
SOLIDOS FIJOS mg/L	278.00	320.00	298.36
SOLIDOS EN SUSPENSION mg/l	1.00	6.00	1.57
SOLIDOS DISUELTOS mg/L	265.00	300.00	289.64
CONDUCTIVIDAD ELECTRICA micromhos/cm	524.00	566.10	547.73
AMONIACO	0.04	0.24	0.10
ALCALINIDAD mg/L	112.00	140.00	125.14
CLORUROS mg/L	38.00	48.00	43.93
FLUORUROS mg/L	0.28	0.67	0.45
NITRITOS mg/l	0.00	0.01	0.00
NITRATOS mg/l	57.20	201.60	92.21
HIERRO TOTAL mg/L	0.00	0.27	0.05
DUREZA mg/L	160.00	206.00	187.29
SULFATOS mg/L	11.00	22.00	15.08
MANGANESO mg/L	0.00	0.07	0.03
SODIO mg/L	6.60	34.00	17.37
POTASIO mg/L	0.50	4.50	2.43
CALCIO mg/L	32.06	46.49	42.12
MAGNESIO mg/L	0.01	26.79	17.31
CLORO RESIDUAL mg/L			
FENOLES mg/L	0.00	0.27	0.04
CIANURO mg/L	0.00	0.01	0.00
CADMIO mg/L	0.00	0.16	0.03
SÍLICE mg/L	35.00	88.10	51.03
PLOMO mg/L	0.00	0.03	0.01
ARSENICO mg/L	0.00	0.01	0.00
CROMO HEXAVALENTE mg/L	0.00	0.08	0.03
MERCURIO mg/L	0.00	0.00	0.00
BORO mg/l			
COBRE mg/L	0.00	0.02	0.01
IS	-1.70	-0.74	-1.28
Coliformes Fecales			

