

**DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE HIERRO Y
MANGANESO UTILIZANDO UN AIREADOR DE BANDEJAS CON LECHOS DE
COQUE, GRAVA Y UNA COMBINACIÓN DE AMBOS EN LA CIUDAD DE SAN
JUAN DE PASTO**

**ANA CRISTINA GARCÉS ERASO
LAURA CAROLINA ROSERO PEPINOSA**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
SAN JUAN DE PASTO
2014**

**DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE HIERRO Y
MANGANESO UTILIZANDO UN AIREADOR DE BANDEJAS CON LECHOS DE
COQUE, GRAVA Y UNA COMBINACIÓN DE AMBOS EN LA CIUDAD DE SAN
JUAN DE PASTO**

**ANA CRISTINA GARCÉS ERASO
LAURA CAROLINA ROSERO PEPINOSA**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Civil**

**DIRECTOR:
Ing. Esp. JAIME EFRÉN INSUASTY ENRÍQUEZ**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
SAN JUAN DE PASTO
2014**

NOTAS DE RESPONSABILIDAD

“La Universidad de Nariño no se hace responsable de las opiniones o resultados obtenidos en el presente trabajo y para su publicación priman las normas sobre el derecho de autor”

Artículo 13° del Acuerdo No 005 de enero 26 de 2010, emanado del Honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

Las ideas y conclusiones aportadas en el siguiente trabajo son responsabilidad exclusiva del autor.

Artículo 1ro del Acuerdo No. 324 de octubre 11 de 1966 emanado del Honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

Nota de aceptación

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

San Juan de Pasto, Febrero de 2014

DEDICATORIA

A Dios, por permitir terminar este trabajo que fue la última fase para conseguir culminar la carrera y como tal iniciar una nueva etapa de la vida con éxito.

A mis padres, familiares y amigos que siempre estuvieron brindando todo su apoyo para enfrentar cada dificultad e imprevisto y que sin duda fueron un gran soporte para continuar con optimismo en el logro de esta meta.

Al personal docente y trabajadores de la Universidad de Nariño, que aportaron sus valiosos conocimientos, colaboración, orientación y supervisión para el planteamiento y desarrollo de este trabajo, en especial al ingeniero Jaime Insuasty Enríquez como asesor de trabajo de grado, al ingeniero Roberto García por su colaboración en el montaje del sistema en el laboratorio de hidráulica, al ingeniero Iván Andrés Sánchez por sus recomendaciones y su acompañamiento durante el desarrollo de este trabajo, al especialista en estadística Álvaro Burbano Montenegro quien brindó su orientación para el análisis e interpretación de resultados.

A la Universidad Mariana por permitir el acceso a sus instalaciones puesto que la fuente de agua subterránea base de investigación pertenece a esta universidad.

Al SENA que aportó los equipos y reactivos para el análisis de muestras en el laboratorio de sus instalaciones. A Gustavo Jurado y Edison Sánchez quienes brindaron su asesoría sobre el manejo de los equipos y su colaboración en las pruebas de laboratorio.

ANA CRISTINA GARCÉS ERASO

DEDICATORIA

A Dios, por brindar siempre la fortaleza y perseverancia necesaria para culminar con éxito y satisfacción este trabajo de grado, porque hubiese sido muy difícil terminarlo sin la constancia y optimismo con la cual se trabajó.

A mis padres por su orientación y apoyo incondicional desde que comencé a desarrollar el trabajo de grado, porque sin ellos no hubiera sido posible culminar esta etapa de mi vida.

Al personal docente por toda su disposición, colaboración y contribución en esta etapa tan importante; gracias por brindar la orientación necesaria en el desarrollo del trabajo de grado y por sus recomendaciones, ya que esto permitió culminar con satisfacción y lograr los objetivos propuestos, en especial al ingeniero Jaime Insuasty Enríquez como asesor de trabajo de grado, al ingeniero Roberto García por su colaboración en el montaje del sistema en el laboratorio de hidráulica, al ingeniero Iván Andrés Sánchez por sus recomendaciones y su acompañamiento durante el desarrollo de este trabajo, al especialista en estadística Álvaro Burbano Montenegro quien brindó su orientación para el análisis e interpretación de resultados.

A la Universidad Mariana por permitir el acceso a sus instalaciones puesto que la fuente de agua subterránea base de investigación pertenece a esta universidad.

Al SENA que aportó los equipos y reactivos para el análisis de muestras en el laboratorio de sus instalaciones. A Gustavo Jurado y Edison Sánchez quienes brindaron su asesoría sobre el manejo de los equipos y su colaboración en las pruebas de laboratorio.

LAURA CAROLINA ROSERO PEPINOSA

RESUMEN

Actualmente, muchas poblaciones afrontan problemas de agua para consumo humano principalmente por la falta de recursos económicos, por lo tanto, se está en una búsqueda continua de tecnologías eficientes, económicas y de bajo consumo de energía que permitan dar solución a estos problemas, es por esto que surgió la necesidad de plantear un proyecto que permita determinar si algunos sistemas dan solución a las problemáticas actuales de agua. Por ello, se presentó y se ejecutó el trabajo de grado titulado “DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE HIERRO Y MANGANESO UTILIZANDO UN AIREADOR DE BANDEJAS CON LECHOS DE COQUE, GRAVA Y UNA COMBINACIÓN DE AMBOS EN LA CIUDAD DE SAN JUAN DE PASTO”

El aireador de bandejas es un dispositivo empleado para la remoción de hierro y manganeso en aguas que presenten un alto contenido de estos minerales; está conformado por una serie de bandejas diseñadas con fondos perforados las cuales poseen un lecho que se usa con el fin de aprovechar el efecto catalítico de los depósitos de hierro y manganeso, mejorando así la remoción del sistema.

En la presente investigación, se recopiló información para el diseño adecuado del aireador de bandejas partiendo de un caudal previamente establecido de 0,1 r/s y de una carga hidráulica de $100 \text{ m}^3/\text{m}^2 \times \text{día}$, el cual se probó con tres tipos de lechos de contacto: grava, coque y una combinación de coque y grava, en donde los diámetros de las partículas se encontraron entre $\frac{1}{2}$ " y 1".

Una vez escogida la fuente de agua base de investigación se procedió a tomar muestras de agua a la entrada y a la salida del aireador, midiéndose los parámetros de hierro total, manganeso total, oxígeno disuelto, temperatura, color y pH, obteniéndose que el lecho más eficiente en cuanto a la remoción de hierro fue la grava con una remoción de 26,01%, mientras que para manganeso fue el lecho de coque y grava con un 24,95%.

ABSTRACT

Nowadays, there are many people that have problems getting drinking water for daily basis due to the lack of economic sources; thus, there is a research that looks for efficient technologies, cheap and that have low consume of energy that can help to resolve this problem; that is why is needed to put up a plan that allow determine if there is any system that could have the solution to water problems. Due to this problem there is a grade work done called “DETERMINATION OF THE EFFICIENCY OF IRON AND MANGANESE REMOVAL USING A TRAY AERATOR WITH BEDS OF COKE, GRAVEL AND A COMBINATION OF BOTH IN SAN JUAN DE PASTO CITY”.

The tray aerator is a device that removes the iron and manganese in the water that have a high content of this minerals; this is made out of a series of trays designed with holes and a bed that take advantage of the catalytic effect of the iron and manganese sources, thus, improving the removal of the system.

In this research, the information was gathered for the right desing to the tray aerator, start out to the flow rate of 0,1 L/s previously established and hydraulic head of $100 \text{ m}^3/\text{m}^2 \times \text{day}$, it was tried with three types of filter beds; coke, gravel and a combination of both, where the particule's diameters were between $\frac{1}{2}$ " and 1".

With the water source used for the research, we proceed to take the water samples to the start and output to the tray aerator, the parameters measured were total iron, total manganese, dissolved oxygen, temperature, color and pH, where the most efficient filter bed for iron removal was gravel with 26,01%, while for the manganese removal the most efficient filter bed was coke and gravel combination with 24,95%.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	19
1. MARCO DE REFERENCIA.....	25
1.1 ASPECTOS TÉCNICOS Y DE DISEÑO DE SISTEMAS DE AIREACIÓN CON LECHOS DE CONTACTO	25
1.1.1 Parámetros de diseño según el reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS – 2000.....	25
1.1.2 Parámetros de diseño según el Instituto Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados (INNA	26
1.2 MATERIALES UTILIZADOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL AIREADOR DE BANDEJAS.....	26
1.2.1 Acero galvanizado.....	26
1.2.2 Recubrimiento mediante pinturas ricas en zinc.....	26
1.3 MÉTODO DE DETERMINACIÓN DE HIERRO Y MANGANESO MEDIANTE ESPECTROFOTOMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA	27
1.3.1 Digestión ácida con ácido nítrico.....	27
2. DESARROLLO DEL TRABAJO	29
2.1 FORMATO PARA LA RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN.....	29
2.2 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA DEL POZO BASE DE INVESTIGACIÓN	32
2.3 DISEÑO DEL AIREADOR DE BANDEJAS CON BASE EN LAS ECUACIONES Y PARÁMETROS EXISTENTES, EVALUANDO LOS TRES LECHOS DE CONTACTO	33
2.3.1 Diseño del tanque elevado encargado de la distribución del agua hacia los aireadores.....	37
2.4 ADQUISICIÓN DE MATERIALES DEL LECHO FILTRANTE	38
2.4.1 Coque.....	38
2.4.2 Grava	40
2.5 CONSTRUCCIÓN DEL AIREADOR DE BANDEJAS.....	42

2.5.1	Acoplamiento del montaje en el laboratorio y bases de funcionamiento	
	Transporte del agua	43
2.6	REALIZACIÓN DE ENSAYOS PARA LOS DIFERENTES LECHOS	44
2.6.1	Prueba hidráulica.	44
2.6.1.1	Primera prueba para comprobar que el caudal es constante.....	44
2.6.1.2	Desarrollo de la prueba hidráulica.	46
2.6.1.3	Protocolo hidráulico	47
2.6.2	Preensayo.	47
2.6.3	Desarrollo del experimento	49
2.6.3.1	Parámetros analizados en el desarrollo de los ensayos.	51
2.7	PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS	53
2.7.1	Análisis de los resultados de eficiencia de remoción de hierro.	54
2.7.2	Análisis de los resultados de eficiencia de remoción de manganeso.....	56
2.7.3	Análisis de los resultados de oxígeno disuelto:	60
2.7.4	Análisis de los resultados de eficiencia de remoción de color.....	62
2.7.5	Análisis de los resultados de la variación de pH:	65
2.8	APLICABILIDAD DEL SISTEMA EN ZONAS RURALES DEL DEPARTAMENTO DE NARIÑO	67
3.	CONCLUSIONES.....	73
4.	RECOMENDACIONES	75
	BIBLIOGRAFÍA.....	76

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 2.1. Curva Granulométrica de la grava	41
Gráfica 2.2. Porcentaje de eficiencia de remoción del parámetro hierro evaluando por día los lechos de contacto.....	55
Gráfica 2.3. Porcentaje de eficiencia de remoción del parámetro hierro evaluando cada lecho de contacto a lo largo del tiempo	56
Gráfica 2.4. Porcentaje de eficiencia de remoción del parámetro manganeso evaluando por día los lechos de contacto.....	58
Gráfica 2.5. Porcentaje de eficiencia de remoción del parámetro manganeso evaluando cada lecho de contacto a lo largo del tiempo	58
Gráfica 2.6. Medias estimadas para el parámetro oxígeno disuelto evaluando por día los lechos de contacto	61
Gráfica 2.7. Medias estimadas para el parámetro oxígeno disuelto evaluando cada lecho de contacto a lo largo del tiempo.....	62
Gráfica 2.8. Porcentaje de eficiencia de remoción del parámetro color evaluando por día los lechos de contacto.....	64
Gráfica 2.9. Porcentaje de eficiencia de remoción del parámetro color evaluando cada lecho de contacto a lo largo del tiempo	64
Gráfica 2.10. Porcentaje de variación de pH evaluando por día los lechos de contacto	66
Gráfica 2.11. Porcentaje de variación de pH evaluando cada lecho de contacto a lo largo del tiempo	66

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

	Pág.
Fotografía 2.1. Coque.....	39
Fotografía 2.2. Trituración del Coque	39
Fotografía 2.3. Coque triturado.....	40
Fotografía 2.4. Aireadores de bandejas.....	43
Fotografía 2.5. Espectrofotómetro de absorción atómica del Laboratorio del SENA.....	52
Fotografía 2.6. Espectrofotómetro de absorción atómica de los Laboratorios Especializados de la Universidad de Nariño	53

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Ensayos a realizar para cada lecho en el aireador de bandejas.....	21
Tabla 2.1. Formato para el desarrollo de los ensayos	30
Tabla 2.2. Resultados de los análisis de hierro y manganeso del agua proveniente del aljibe de la Universidad Mariana	33
Tabla 2.3. Dimensiones de las bandejas según el diseño	35
Tabla 2.4. Área requerida en los orificios de la bandeja superior para garantizar diseño hidráulico del aireador de bandejas.....	36
Tabla 2.5. Área requerida en los orificios de la bandeja intermedia para garantizar diseño hidráulico del aireador de bandejas.....	36
Tabla 2.6. Área requerida en los orificios de la bandeja inferior para garantizar diseño hidráulico del aireador de bandejas.....	36
Tabla 2.7. Número y diámetro de orificios escogidos para cada bandeja definidos experimentalmente	36
Tabla 2.8. Número y diámetro de orificios escogidos para el diseño final	37
Tabla 2.9. Resultados de gravedad específica y porcentaje de absorción para la grava	42
Tabla 2.10. Aforos para comprobación del caudal de diseño	46
Tabla 2.11. Resultados de parámetros estadísticos	46
Tabla 2.12. Parámetros medidos para cada muestra de agua durante el desarrollo del experimento.....	52
Tabla 2.13. Estimaciones estadísticas de cada lecho probado en cuanto a eficiencia de remoción de hierro	54
Tabla 2.14. Estimaciones estadísticas en cuanto a eficiencia de remoción de hierro teniendo en cuenta el lecho probado y el tiempo.....	55
Tabla 2.15. Estimaciones estadísticas de cada lecho probado en cuanto a eficiencia de remoción de manganeso.....	57
Tabla 2.16. Estimaciones estadísticas en cuanto a eficiencia de remoción de manganeso teniendo en cuenta el lecho probado y el tiempo	57

Tabla 2.17.	Estimaciones estadísticas de cada lecho probado en cuanto a oxígeno disuelto.....	60
Tabla 2.18.	Estimaciones estadísticas en cuanto a oxígeno disuelto.....	61
Tabla 2.19.	Estimaciones estadísticas de cada lecho probado en cuanto a eficiencia de remoción de color	63
Tabla 2.20.	Estimaciones estadísticas en cuanto a eficiencia de remoción de color teniendo en cuenta el lecho probado y el tiempo	63
Tabla 2.21.	Estimaciones estadísticas de cada lecho probado en cuanto a variación de pH.....	65
Tabla 2.22.	Estimaciones estadísticas en cuanto a variación de pH teniendo en cuenta el lecho probado y el tiempo	65
Tabla 2.23.	Uso del agua subterránea según jurisdicción de la autoridad ambiental.	69
Tabla 2.24.	Sistema actual del acueducto de Chochachi.	70
Tabla 2.25.	Sistema actual del acueducto de Guespud.....	71
Tabla 2.26.	Utilización de agua subterránea en el sector rural.....	72
Tabla 2.27.	Utilización de agua subterránea en el sector urbano.....	72

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1. Frasco de Mariotte teórico y en laboratorio.....	38
Figura 2.2. Ubicación de la provincia hidrogeológica de Cauca- Patía.....	68

LISTA DE ANEXOS EN MEDIO MAGNÉTICO

ANEXO A. Diseño del aireador de bandejas

ANEXO B. Cálculo de la altura a la cual debe estar el tubo de Mariotte respecto al orificio inferior del tanque elevado

ANEXO C. Ensayo de granulometría y de gravedad específica

ANEXO D. Resultados de la prueba hidráulica

ANEXO E. Preensayo

ANEXO F. Aforos realizados durante el preensayo

ANEXO G. Cálculo de porcentajes de eficiencias de remoción de hierro, manganeso y color, aireación e introducción de pH

ANEXO H. Desarrollo de ensayos con los diferentes lechos de contacto: grava, coque y combinación de coque y grava

ANEXO I. Resultados obtenidos con el programa SPSS versión 20

ANEXO J. Registro fotográfico

GLOSARIO

Absorbancia: Es la cantidad de intensidad de luz que absorbe una muestra. La absorbancia es adimensional y generalmente se presenta con mínimo tres decimales, algunos instrumentos permiten obtenerla con cuatro decimales.

Aforo volumétrico: Es aplicable en la medición de pequeños caudales y se realiza midiendo el tiempo de llenado (t) de un recipiente de volumen conocido (V), donde se colecta la descarga.

Barómetro: Este es un instrumento para medir la presión atmosférica, es decir, la fuerza por unidad de superficie ejercida por el peso de la atmósfera.

Catálisis: Es el proceso por el cual se aumenta la velocidad de una reacción química, debido a la participación de una sustancia llamada catalizador. El catalizador no se modifica durante la reacción química, lo cual lo diferencia de un reactivo.

Color: Es la propiedad óptica que consiste en modificar la composición espectral de la luz visible transmitida.

Colorímetro: Es un instrumento que permite medir la absorbancia de una solución en una específica frecuencia de luz a ser determinada. Es por eso, que hacen posible descubrir la concentración de un soluto conocido que sea proporcional a la absorbancia.

Espectrofotometría de absorción atómica: Consiste en la medición de las especies atómicas por su absorción a una longitud de onda particular. La especie atómica se logra por atomización de la muestra, siendo los distintos procedimientos utilizados para llegar al estado fundamental del átomo lo que diferencia las técnicas y accesorios utilizados.

Oxígeno Disuelto: Es la cantidad de oxígeno que está disuelta en el agua. Es un indicador de que tan contaminada está el agua. Generalmente, un nivel más alto de oxígeno disuelto indica agua de mejor calidad. Si los niveles de oxígeno disuelto son demasiado bajos, algunos peces y otros organismos no pueden sobrevivir.

Oxímetro: Dispositivo utilizado para medir la cantidad de oxígeno que está presente en el agua.

pH: Es una medida de acidez o alcalinidad de una disolución. El pH indica la concentración de iones hidronio $[H_3O^+]$ presentes en determinadas sustancias.

pH-metro: Es un instrumento que tiene un sensor (electrodo) que utiliza el método electroquímico para medir el pH de una disolución.

Presión atmosférica: Es la fuerza por unidad de superficie que ejerce el aire de la atmósfera sobre la superficie terrestre como consecuencia de la gravedad.

Temperatura: Se define como una magnitud escalar relacionada con la energía interna de un sistema termodinámico, definida por el principio cero de la termodinámica.

UPC: (Unidades de Platino - Cobalto) Es una medida del Color que le confieren al agua los materiales contaminantes. La unidad Platino – Cobalto es la que se produce al disolver un mg de platino/L en forma de ion cloroplatinato.

INTRODUCCIÓN

El hierro y el manganeso son elementos comunes en la superficie de la tierra. A medida que el agua se filtra por el suelo y las rocas, puede disolver estos minerales y acarrearlos hacia el agua subterránea. Ambos metales son perjudiciales, no causan problemas de salud pero sí presentan bastantes dificultades en el abastecimiento del agua potable, por ejemplo en los sistemas de distribución de agua, el hierro aparece como un producto de la corrosión. Ambos metales hacen que el agua tenga un sabor desagradable para el consumo humano y quede inservible para lavandería, teñido, la producción de papel y otros procesos de manufactura.

El hierro y el manganeso pueden removerse mediante varios procesos, uno de ellos es la aireación el cual solo oxida estos metales, sin embargo combinando el proceso mediante el uso de lechos como la grava o coque, permiten su remoción, por lo cual ocupan un lugar único en la administración de la calidad del agua y son factores importantes en la autopurificación de las aguas naturales¹.

Teniendo en cuenta que en la actualidad se buscan tecnologías eficientes; promover la utilización del sistema de aireación resultaría útil siempre y cuando se aproveche la eficiencia del sistema al máximo. Además, el coque se puede obtener a partir de la carbonización a alta temperatura de un carbón o mezcla de carbones² y a su vez se puede producir carbón utilizando distintos materiales y desechos orgánicos e inorgánicos, de modo que la utilización del coque, indicaría de una u otra manera una contribución con el medio ambiente.

La presente investigación pretendió determinar la eficiencia del proceso de aireación en la remoción de hierro y manganeso utilizando diferentes lechos, tales como la grava y el coque y finalmente establecer su aplicabilidad en fuentes con altos contenidos de estos metales.

¹ GORDON MASKEW FAIR, JOHN CHARLES GEYER, DANIEL ALEXANDER OKUN, Purificación de aguas y tratamiento y remoción de aguas residuales, 1ra edición, volumen II, Editorial Limusa-Wiley, S.A., México, 1971, pp. 352.

² Coque Siderúrgico [En línea]. [Citado marzo de 2013]. Disponible en internet <http://digital.csic.es/bitstream/10261/5211/1/Coque%20Sider%C3%BArgico.%201.%20Definici%C3%B3n%20y%20propiedades.pdf>

TEMA

Título:

DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE HIERRO Y MANGANESO UTILIZANDO UN AIREADOR DE BANDEJAS CON LECHOS DE COQUE, GRAVA Y UNA COMBINACIÓN DE AMBOS EN LA CIUDAD DE SAN JUAN DE PASTO.

Modalidad:

El presente proyecto de Trabajo de Grado corresponde a la modalidad de Investigación experimental.

Área:

Hidráulica

Línea de investigación:

Fuente

Proyecto Educativo del Programa de Ingeniería Civil.

ALCANCE Y DELIMITACIONES

Teniendo en cuenta que la remoción de hierro y manganeso es fundamental para el tratamiento de agua destinada al consumo humano y que en Colombia según el Decreto 1575 de 2007 y la Resolución 2115 del 22 de junio de 2007, el nivel máximo permitido de hierro es 0,3 mg/ y para manganeso es 0,1 mg/l, en la presente investigación se pretende determinar la eficiencia de remoción de estos dos elementos en un efluente de un pozo que supere los parámetros establecidos en el Decreto 1575 de 2007 y la Resolución 2115 del 22 de junio de 2007, en Pasto Nariño, utilizando como sistema de oxidación y precipitación un aireador de bandejas con dos lechos diferentes. Por un lado un lecho de grava, por otro un lecho de coque y finalmente una combinación de ambos lechos. Lo anterior con el fin de establecer cuál de los tres lechos es más eficiente en condiciones predeterminadas. (ver tabla 1)

Tabla 1. Ensayos a realizar para cada lecho en el aireador de bandejas

Lechos en el aireador de bandejas	Punto de muestreo	Parámetros a medir
Con grava	Entrada y salida del Aireador de bandejas	Hierro (mg/l) Manganeso (mg/l) Caudal (l/s) Temperatura (°C) pH
Con coque		
Con grava y coque		

Dimensiones del aparato:

Las dimensiones del sistema se diseñaron en el proceso de desarrollo del trabajo de grado, teniendo en cuenta un caudal conveniente para construir el prototipo y según las características del agua a tratar. Sin embargo, se tuvo en cuenta los siguientes parámetros: carga hidráulica, número de bandejas, altura total del aireador, espesor de los lechos de contacto, diámetro de orificios de distribución, separación entre orificios, separación entre bandejas, entre otros.

JUSTIFICACIÓN

Tanto el hierro como el manganeso generan problemas en suministros de agua. En general, estos problemas son más comunes en aguas subterráneas y en algunos casos también en aguas superficiales de algunos ríos y embalses.

Ambos metales son perjudiciales, puesto que interfieren en las operaciones de lavado, imparten tinciones indeseables a los accesorios de plomería (el hierro provee tinción rojiza o naranja mientras que el manganeso da un color negro a carmelita y tinción negruzca), causan incrustaciones en las tuberías y dificultades en los sistemas de distribución al soportar crecimientos de bacterias del hierro como *Crenothrix*, *Leptothrix*, *Galionella*, y del manganeso como *Sphaerotilus* y *Leptothrix*; también ocasionan una demanda alta de cloro. Igualmente el hierro y el manganeso, en bajas concentraciones, imparten sabores metálicos amargos al agua.³

Cuando el contenido de hierro del agua es alto, el ácido tánico del té y del café se puede combinar con el hierro para ennegrecer la bebida, además el café se hace desagradable al paladar si el contenido de hierro excede de 1 mg/l.³

³ ROMERO ROJAS, Jairo Alberto, Calidad del agua, 2 edición, Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, Colombia, julio de 2005, pp. 165.

Por lo anterior es indispensable determinar la cantidad de hierro y manganeso cuando se realicen estudios de nuevas fuentes de abastecimiento de agua, sobre todo cuando estas fuentes son subterráneas.

Según el Decreto 1575 de 2007 y la Resolución 2115 del 22 de junio de 2007, el valor máximo admisible para agua destinada a consumo humano es de 0,3 mg/l para hierro, y de 0,1 mg/l para el manganeso.

La aireación es el proceso de tratamiento mediante el cual se incrementa el área de contacto del agua con el aire para facilitar el intercambio de gases y sustancias volátiles y a su vez remover sustancias como el hierro.⁴

Es así como la presente investigación pretende determinar la eficiencia de remoción de hierro y manganeso mediante el sistema de aireación por bandejas utilizando lechos de coque, grava y una combinación de ambos. En general este trabajo se justifica porque si existe la posibilidad de utilizar aguas subterráneas como fuente abastecimiento en una población, es necesario que los contenidos de Fe y Mn estén dentro de los valores permitidos por la norma para el consumo humano. La aireación con bandejas es un método económico para lograr dichos objetivos.

PROBLEMA OBJETO DE ESTUDIO

Planteamiento del problema:

Es indispensable determinar la concentración de hierro y manganeso cuando se realizan estudios de nuevas fuentes de abastecimiento de agua, sobre todo cuando estas fuentes son subterráneas, ya que según investigaciones realizadas, las aguas subterráneas pueden contener cantidades apreciables de hierro, comúnmente hasta 10 mg/l y raras veces hasta de 50 mg/l; por su parte las concentraciones de manganeso suelen ser también altas, es común encontrar concentraciones hasta de 1 mg/l en aguas subterráneas con hierro³.

Las aguas superficiales por lo general contienen cantidades bajas de hierro, sin embargo, si son fuentes destinadas para el consumo humano deberán cumplir con lo establecido en el Decreto 1575 de 2007 y la Resolución 2115 del 22 de junio de 2007, en el cual el valor máximo permisible para agua destinada a consumo humano es de 0,3 mg/l para hierro y de 0,1 mg/l para manganeso, por lo cual resulta necesario determinar la concentración de hierro y manganeso.

⁴ NARVÁEZ HERNANDEZ, Mauricio Biron Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Diseño de un sistema potabilización a partir de un agua subterráneas, para la planta de los Álamos de la ciudad de Francisco de Orellana, pp. 75.[En línea]. [Citado marzo de 2013]. Disponible en internet <http://dspace.espace.edu.ec/bitstream/123456789/686/1/96T00140.pdf>

Hasta donde se conoce, el consumo humano de hierro y manganeso no tiene efectos nocivos para la salud, sin embargo la determinación del hierro es muy útil en el control de la corrosión de tuberías de hierro fundido o de hierro galvanizado, en las que aguas corrosivas producen problemas de enrojecimiento o coloración, además es útil para determinar qué tipo de tratamiento se puede aplicar al agua para la remoción de estos dos metales.⁵

Las fuentes cercanas a volcanes suelen contener cantidades apreciables de hierro debido al contacto con la ceniza volcánica la cual está compuesta principalmente por óxidos de sílice, aluminio, hierro, magnesio, calcio, sodio, potasio, plomo y algunos metales pesados⁶, de aquí la importancia en resaltar que existen fuentes de abastecimiento de agua potable en algunas zonas rurales y pequeñas poblaciones que son cercanas al volcán Galeras y que por ende estas fuentes podrían contener cantidades apreciables de este metal.

La presente investigación pretende determinar la eficiencia del sistema de aireación por bandejas, en función de tres lechos: grava, coque y una combinación de ambos, para determinar el sistema más eficiente y su aplicabilidad en algunas zonas rurales aledañas al volcán Galeras o bien para ser utilizada como apoyo para el desarrollo de nuevas investigaciones que permitan el avance hacia nuevos sistemas de tratamiento que sean económicos y eficientes, para la remoción de hierro y manganeso.

Formulación del problema:

¿Existe un estudio sobre la eficiencia de remoción de hierro y manganeso de un aireador de bandejas en función del tipo de lecho utilizado como sistema de contacto, específicamente mediante el uso de grava, coque y una combinación de los dos en la ciudad de San Juan de Pasto?

OBJETIVOS

Objetivo general:

Determinar el lecho más eficiente en un aireador de bandejas, utilizando coque, grava y una combinación de los dos materiales en cuanto a remoción de hierro y manganeso, para establecer su aplicabilidad en fuentes con alto contenido de estos minerales.

⁵ ROMERO ROJAS, Jairo Alberto, Calidad del agua, 2^{da} edición, Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, Colombia, julio de 2005, pp. 165.

⁶ Salud ambiental y el riesgo volcánico, Capítulo 3: Contaminación atmosférica por emisiones volcánicas, pp. 55-64 (marzo 2013). [en línea], [citado marzo de 2013]. Disponible en internet http://cidbimena.desastres.hn/docum/ops/Volcanes/gv_modulo4-3.pdf

Objetivos específicos:

- ✓ Diseñar un aireador de bandejas teniendo en cuenta un caudal previamente establecido y las características de los lechos para aireación (grava, coque y combinación de grava y coque)
- ✓ Construir un aireador de bandejas con base en el diseño pre establecido.
- ✓ Determinar la eficiencia de remoción de los diferentes lechos con caracterización del agua en cuanto a contenidos de Fe y Mn antes de la entrada del aireador y a la salida del mismo y con los resultados encontrados establecer la eficiencia de remoción con cada lecho probado.

1. MARCO DE REFERENCIA

1.1 ASPECTOS TÉCNICOS Y DE DISEÑO DE SISTEMAS DE AIREACIÓN CON LECHOS DE CONTACTO

A continuación se indican los parámetros de diseño establecidos en algunas normas.

1.1.1 Parámetros de diseño según el reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS – 2000. Esta norma contiene las recomendaciones y parámetros de diseño para los aireadores de bandejas en el Título C, a continuación se citan algunos numerales:

C.3.4.3.1 Bandejas de coque: Debe constar de una serie de bandejas equipadas con ranuras, fondos perforados o mallas, las cuales deben contener un medio grueso o de coque. El agua debe distribuirse sobre estas bandejas y caer a un tanque receptor. El coque aumenta la eficiencia del intercambio de gases y la distribución del agua.

La corrosión, la formación de lamas biológicas y el crecimiento de algas son factores que deben considerarse en la selección del material de construcción. Acero inoxidable, aluminio, concreto o maderas resistentes son los materiales más usados por su durabilidad. Debe asegurarse una buena distribución del agua sobre el área total de la bandeja para obtener una buena eficiencia.⁶

C.3.5.3.a. Diseño de la unidad: Los aireadores de bandejas de coque se diseñaron teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

- Cargas superficiales menores de $100 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{día})$.
- Área de 0.5 a 2 m^2 cada 1000 m^3 de capacidad.
- De 3 a 5 bandejas.
- El espaciamiento entre bandejas de 0.3 m a 0.75 m .
- Profundidad del agua en la bandeja de aproximadamente 0.15 m .

b. Lecho de coque: Para el lecho de coque, el espesor debe ser de 0.15 m a 0.3 m y el tamaño de partícula de coque de 0.05 m a 0.15 m .⁷

⁷ RAS 2000 Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico, Título C, Colombia, 2000, pp.29, 32. [En línea]. [Citado junio de 2013]. Disponible en internet: http://cra.gov.co/apc-aa-iles/37383832666265633962316339623934/5_.pdf

1.1.2 Parámetros de diseño según el Instituto Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados (INNA)⁷. Este instituto es el Ente Regulador del Sector Agua y Saneamiento de Nicaragua, el cual tiene dentro de sus funciones la elaboración de Normas para el buen desarrollo y funcionamiento de los sistemas actuales y futuros del sector. Dentro de las Normas de diseño de sistemas de abastecimiento y potabilización del agua, contienen recomendaciones de diseño para los aireadores de tableros o bandejas en las cuales se menciona que el tamaño del material que conforma el lecho (Coque, grava o escoria) debe estar entre 0.012 m a 0.025 m.⁸

1.2 MATERIALES UTILIZADOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL AIREADOR DE BANDEJAS

1.2.1 Acero galvanizado. La galvanización del acero se ha convertido desde hace mucho tiempo en uno de los sistemas de protección que ofrece mayores garantías de durabilidad para los elementos expuestos a ambientes agresivos. El tratamiento del acero por estos procedimientos se basa en el recubrimiento del mismo por una capa de zinc que actúa como protectora. Esta protección puede llevarse a cabo por cualquiera de los siguientes procedimientos, algunos de ellos ligeras variantes de otros:

Recubrimiento mediante pinturas ricas en zinc (galvanizado en frío), metalizado con zinc (mediante proyección de zinc semifundido sin aleación), zincado electrolítico basado en un recubrimiento mediante electrolisis de zinc en disolución acuosa, galvanizado en caliente (con formación de aleación) y procedimientos con aleaciones mixtas (aluminio, zinc y silicio).⁹

1.2.2 Recubrimiento mediante pinturas ricas en zinc. Este tipo de protección consiste en el recubrimiento mediante aplicación con brocha o spray de pinturas ricas en zinc. Su objetivo es la protección catódica del acero, mediante la acción electroquímica, sin llegar a formar aleación alguna, sino actuando como barrera protectora entre soporte de acero y atmósfera, a la vez que ofrece un ánodo del sacrificio, el zinc del recubrimiento. Este tratamiento es conocido como galvanización en frío. Su composición se basa en gránulos de zinc dispersos en un soporte o vehículo orgánico, alcanzando hasta el 95% de su peso en zinc, lo

⁸ Dpto. de Fiscalización del Instituto Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados (INAA), Normas de Diseño de Sistemas de Abastecimiento y Potabilización del Agua, Nicaragua, pp. 57

⁹ VERA SORIANO, Roberto, Temas de construcción, 2 Edición, Editorial Club Universitario, 2001 pp. 52-55. [En línea]. [Citado junio de 2013]. Disponible en internet:<http://books.google.com.co/books?id=2jicTMaMhoIC&pg=PA52&dq=acero+galvanizado&hl=es&sa=X&ei=upjkUc2aDcTBygHB8oHwCA&ved=0CGAQ6AEwCA>

que significa entre un 55% a un 65% de volumen de zinc por unidad de volumen de pintura. Se alcanzan espesores de 10 a 120 μ .

Es conveniente tener en cuenta que la resistencia a la abrasión de estas pinturas es muchísimo menor que el recubrimiento en caliente, lo que es de suma importancia, en elementos expuestos a roces, golpes y rayados. Este recubrimiento también presenta la dificultad propia de todas las pinturas, la de la aplicación regular de los gruesos especificados y la del control de los mismos en obra, a lo que se une la imposibilidad práctica del pintado interior de los elementos huecos.¹⁰

1.3 MÉTODO DE DETERMINACIÓN DE HIERRO Y MANGANESO MEDIANTE ESPECTROFOTOMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA

La absorción atómica es una técnica capaz de detectar y determinar cuantitativamente la mayoría de los elementos del sistema periódico. Sus campos de aplicación son, por tanto, muy diversos. Este método se puede aplicar para la determinación de ciertos metales, tales como: antimonio, cadmio, calcio, cesio, cromo, cobalto, oro, níquel, entre otros.

Se emplea en el análisis de aguas, análisis de suelos, bioquímica, toxicología, medicina, industria farmacéutica, industria alimenticia, industria petroquímica, etc. Este método consiste en la medición de las especies atómicas por su absorción a una longitud de onda particular.

La especie atómica se logra por atomización de la muestra, siendo los distintos procedimientos utilizados para llegar al estado fundamental del átomo lo que diferencia las técnicas y accesorios utilizados.

La técnica de atomización más usada es la de Absorción atómica con flama o llama, que nebuliza la muestra y luego la disemina en forma de aerosol dentro de una llama de aire acetileno u óxido nitroso-acetileno.¹¹

1.3.1 Digestión ácida con ácido nítrico. Los métodos de digestión se usan para reducir interferencias debido a la presencia de materia orgánica, y convertir los metales a una forma en que si se puedan analizar; generalmente el metal puro.

¹⁰ *Ibíd.*

¹¹ Espectrofotometría de absorción atómica [En línea]. [Citado noviembre de 2013]. Disponible en internet http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leia/choussy_c_d/apendiceC.pdf

La digestión con Ácido Nítrico es adecuada para la extracción de diversos metales, además de que los nitratos proporcionan una buena matriz para las determinaciones mediante espectrofotometría de Absorción Atómica, sin embargo algunas muestras necesitarán la adición de diferentes ácidos para lograr una digestión completa.¹²

¹² Método de determinación mediante espectrofotometría de absorción atómica [Documento electrónico, Online]. [Citado noviembre de 2013]. Disponible en internet http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leia/morales_g_lt/apendiceB.pdf

2. DESARROLLO DEL TRABAJO

2.1 FORMATO PARA LA RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

Fue necesario elaborar un formato para recopilar la información y realizar el registro de todos los datos que se obtuvieron en el trabajo de laboratorio de manera eficiente y eficaz, y que proporcione las facilidades necesarias para el posterior análisis estadístico. A continuación, se describe cada una de las partes que componen el formato.

Día de prueba: Corresponde al día en el cual se realiza el ensayo para el lecho, son 3 días de prueba para cada lecho.

Fecha: Se registra la fecha (día-mes-año) de acuerdo con el día en el cual se realizó la prueba.

Hora: Se registra la hora en la cual se empezó la realización del ensayo.

Tiempo de prueba: Es el tiempo transcurrido (en minutos) en el cual se realiza el aforo.

Volumen (V): Se registra el resultado del volumen medido en la probeta en m^3 .

Tiempo (t): Se registra el tiempo que se contabilizó en el cronómetro en segundos.

Caudal (Q): Se anota el resultado de la relación que existe entre el volumen (V) y el tiempo (t), en m^3/s .

Punto de medición: Es el punto donde se realiza la toma de la muestra de agua para realizar la medición de los siguientes parámetros: Oxígeno disuelto, pH, temperatura, color, hierro y manganeso. Los puntos de medición son dos: En la entrada al aireador de bandejas y a la salida del aireador de bandejas.

Entrada al aireador: Es el punto de medición en el cual la muestra de agua es tomada antes de que el agua ingrese al aireador de bandejas.

Salida al aireador: Es el punto de medición en el cual la muestra de agua es tomada después de que el agua ha realizado su trayectoria por el aireador de bandejas.

Día y tiempo de prueba: Corresponde al día en el cual se prueba el lecho de contacto que puede ser coque, grava o la combinación de ambos.

Oxígeno Disuelto (OD) y temperatura (T°): Corresponde al resultado de la medición de oxígeno disuelto y de la temperatura del agua realizada con el oxímetro. Estos parámetros se miden a los 20 y 40 minutos de poner en funcionamiento el sistema, además la medición se realiza a la entrada y a la salida del aireador de bandejas.

pH y temperatura (T°): Corresponde al resultado de la medición de pH y temperatura del agua realizada con el pH-metro. Estos parámetros se miden a los 45 minutos de poner en funcionamiento el sistema, además la medición se realiza a la entrada y a la salida del aireador de bandejas.

Lecturas Absorbancia: Corresponde a la lectura de color en absorbancia que resulta del colorímetro. Se realizan 5 lecturas por cada muestra de agua tomada a los 45 minutos.

Promedio: Corresponde al promedio de las 5 mediciones de color que se leen en el colorímetro, la unidad es adimensional (absorbancia).

Promedio (UPC): Corresponde al promedio de las 5 mediciones de color que se leen en el colorímetro, la unidad es UPC (Unidades de Platino-Cobalto).

Hierro: Es el contenido de hierro total en mg/l que contiene la muestra de agua a los 45 minutos. La medición de hierro se la realiza antes de la entrada al aireador y a la salida del mismo.

Manganeso: Es el contenido de manganeso total en mg/l que contiene la muestra de agua a los 45 minutos. La medición de manganeso se la realiza antes de la entrada al aireador y a la salida del mismo.

En la Tabla 2.1, se indica el formato utilizado para el desarrollo de los ensayos.

Tabla 2.1. Formato para el desarrollo de los ensayos

Unidad experimental N. (Aireador N. – Lecho N.)		
Día de prueba	Fecha	Hora
Día 1		
Día 2		
Día 3		

Aforos realizados durante el funcionamiento del sistema

Tiempo de prueba	Día 1			Día 2			Día 3		
	V(m ³)	t(s)	Q(m ³ /s)	V(m ³)	t(s)	Q(m ³ /s)	V(m ³)	t(s)	Q(m ³ /s)

Oxígeno disuelto y pH

Punto de medición	Día y tiempo de prueba	20 minutos		40 minutos		45 minutos	
		OD (mg/l)	T (°C)	OD (mg/l)	T (°C)	pH	T(°C)
Entrada del aireador	Día 1						
	Día 2						
	Día 3						
Salida del aireador	Día 1						
	Día 2						
	Día 3						

Color

Punto de medición	Día y tiempo de prueba	45 minutos						
		Lecturas (absorbancia)					Promedio	Promedio (UPC)
		1	2	3	4	5		
Entrada del aireador	Día 1							
	Día 2							
	Día 3							
Salida del aireador	Día 1							
	Día 2							
	Día 3							

Hierro y Manganeso

Punto de medición	Día y tiempo de prueba	45 minutos	
		Hierro (mg/l)	Manganeso (mg/l)
Entrada del aireador	Día 1		
	Día 2		
	Día 3		
Salida del aireador	Día 1		
	Día 2		
	Día 3		

2.2 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA DEL POZO BASE DE INVESTIGACIÓN

Para escoger el pozo base de investigación se contó con tres alternativas iniciales las cuales son el pozo del hotel Cuellar, el pozo de la Universidad Mariana sede Alvernia y el pozo de la Universidad Mariana, sede principal.

a) Pozo del Hotel Cuellar: Se realizó una muestra puntual, con el fin de establecer si el contenido de hierro y manganeso en el agua era superior al de la norma; sin embargo, los resultados arrojados por la muestra, demostraron que el agua del pozo contiene hierro y manganeso pero en proporciones menores a las establecidas por norma, es decir 0,3 y 0,1 mg/l respectivamente.

b) Pozo de la Universidad Mariana sede Alvernia: Su excavación y puesta en marcha estaba programada para el mes de julio de 2013; sin embargo, dado que la profundidad de la excavación necesaria era a 200 m y se encontró con un estrato rocoso no previsto, el proceso se detuvo y por lo tanto se retrasó la obra. Por esta razón, este pozo fue descartado para realizar la muestra puntual para evitar retrasos en el cronograma.

c) Pozo de la Universidad Mariana sede principal: Ante la situación anterior fue necesario buscar otra alternativa para realizar el estudio respectivo, escogiéndose el pozo de la Universidad Mariana sede principal, puesto que según análisis realizados en el año 2012 este presenta cantidades de hierro y manganeso superiores a las establecidas por el Decreto 1575 de 2007¹³ y la Resolución 2115 de 22 de junio de 2007¹⁴ por el cual se expiden normas técnicas de calidad del agua potable, lo cual indica que este pozo es apto para la investigación.

Para la caracterización del pozo base de investigación se tomaron muestras compuestas en el tiempo por un periodo de 6 días a las cuales se analizó los parámetros de hierro y manganeso total en mg/l. Las muestras compuestas se las realizó como una combinación de 2 muestras individuales de agua tomadas a las 09:00 am y a las 03:00 pm, esto con el fin de minimizar los efectos de variabilidad de la muestra individual. La caracterización se efectuó a partir del día 2 de septiembre de 2013 y una vez finalizada esta caracterización se procedió a llevar las muestras a los laboratorios Especializados de la Universidad de Nariño para ser analizados el día 18 de septiembre de 2013. Los resultados se indican en la Tabla 2.2.

¹³ Decreto 1575 de 2007, Colombia, 2007. [En línea]. [Citado junio de 2013]. Disponible en internet. <http://es.scribd.com/doc/55445386/Decreto-1575-de-2007-PDF-Agua-Potable>

¹⁴ ¹²Resolución 2115 de 22 de junio de 2007, Colombia, 2007. [En línea]. [Citado junio de 2013]. Disponible en internet. <http://es.scribd.com/doc/55906698/Resolucion-2115-07-Calidad-Agua-Potable>

Tabla 2.2. Resultados de los análisis de hierro y manganeso del agua proveniente del aljibe de la Universidad Mariana

Fecha	Hierro (mg/l)	Manganeso (mg/l)
02 de septiembre de 2013 (lunes)	0,82	0,12
11 de septiembre de 2013 (miércoles)	0,45	0,32
12 de septiembre de 2013 (jueves)	0,12	0,05
13 de septiembre de 2013 (viernes)	0,20	0,34
16 de septiembre de 2013 (Lunes)	0,16	0,14
17 de septiembre de 2013 (martes)	0,57	0,12

De acuerdo con la Tabla 2.2. se puede observar que el contenido de hierro y de manganeso varía de manera significativa en los diferentes días en los cuales se realizó la caracterización, además en algunos días los contenidos de hierro y manganeso son inferiores a lo estipulado en el Decreto 1575 de 2007¹⁵ y la Resolución 2115 de 22 de junio de 2007¹⁶, sin embargo calculando el promedio de los contenidos que posee la fuente en los 6 días en los cuales se realizó la caracterización, se obtiene un valor promedio de 0,387 mg/l para hierro y de 0,182 mg/l para manganeso, los cuales sobrepasan los valores estipulados en el Decreto mencionado anteriormente.

2.3 DISEÑO DEL AIREADOR DE BANDEJAS CON BASE EN LAS ECUACIONES Y PARÁMETROS EXISTENTES, EVALUANDO LOS TRES LECHOS DE CONTACTO

El diseño del aireador de bandejas se realizó con base en el libro *purificación del agua* de Jairo Alberto Romero Rojas (Colombia, 2005) y además según las recomendaciones establecidas por la RAS 2000 (Colombia, 2000). El libro *purificación de agua* contiene un orden metodológico con los pasos a realizarse para calcular las dimensiones del aireador de bandejas y recomendaciones para el diseño del aireador.

Para empezar con el diseño del aireador en primera instancia se debe determinar la carga hidráulica superficial con la cual se va a trabajar, por lo cual la RAS 2000 (Colombia, 2000) recomienda utilizar una carga hidráulica superficial menor a $100 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$, debido a que entre menor sea esta carga, menor también será la velocidad a la que el agua avanzará, lo cual supone un mayor tiempo de contacto con los lechos de las bandejas. En el diseño se tomó una carga hidráulica superficial de $100 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$.

¹⁵ Decreto 1575 de 2007, Op. Cit.,

¹⁶ Resolución 2115, op. Cit.,

En cuanto al caudal de diseño se tomó 0,1 L/s, debido a que facilita la construcción del aireador y el montaje en el laboratorio tales como los tanques de almacenamiento y distribución del agua, además permite transportar una cantidad moderada de agua diaria para mantener el aparato en funcionamiento durante 45 minutos.

Una vez determinada la carga hidráulica superficial se procedió al cálculo del área total de las bandejas que se determina mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Área total de bandejas} = \frac{Q}{\text{Carga hidráulica}} \quad (1)$$

El aireador fue diseñado para 3 bandejas, puesto que es lo mínimo recomendado en la RAS 2000 (Colombia, 2000), como se puede observar en el literal C.3.5.3.1. Posteriormente se procedió a determinar el área individual de cada bandeja teniendo en cuenta que el área de la bandeja inferior debe ser más grande que la intermedia y a su vez el área de la bandeja intermedia debe ser más grande que el área de la bandeja superior. Finalmente se chequeó que la suma de las áreas de cada una de las bandejas sea superior al área calculada anteriormente.

Posteriormente se procedió a determinar para cada bandeja el diámetro y número de orificios, la separación entre ellos y el número de filas. Para esto se siguen las recomendaciones establecidas en el libro Purificación del agua de Jairo Alberto Romero Rojas (Colombia, 2005). En seguida se procede a calcular el área total de los orificios en cada bandeja mediante la siguiente expresión:

$$A_o = \frac{\pi \cdot \varphi^2 \cdot N^2}{4} \quad (2)$$

Donde:

φ : Diámetro de cada orificio (cm)

N: Número de orificios por fila

Para la velocidad del flujo en el aireador se debe tener en cuenta el caudal y el área total de los orificios para no sobrepasar la capacidad del aireador, para esto se utilizó la siguiente ecuación:

$$V = \frac{Q}{A_o} \quad (3)$$

Donde:

Q = caudal (m³/s)

A_o = área total de los orificios en cada bandeja (m)

Posteriormente, se procedió a calcular la altura del agua en la bandeja, así:

$$H = \frac{v^2}{2 * g * C_V} \quad (4)$$

Donde:

H = Altura del agua en la bandeja (m)

g = Gravedad (m/s²)

C_V = Coeficiente de velocidad (-)

Finalmente se procedió a determinar el espesor de los lechos y el borde libre, lo cual permitió calcular la altura total de cada bandeja y posteriormente la altura total del aireador. Todos los resultados de los cálculos para las 3 bandejas se encuentran en el Anexo A. Las dimensiones de las bandejas se resumen en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Dimensiones de las bandejas según el diseño

Dimensiones	Bandeja superior	Bandeja intermedia	Bandeja inferior
Lado (m)	0,15	0,20	0,25
Altura de la bandeja (m)	0,25	0,2	0,2
Borde libre (m)	0,092	0,047	0,047
Altura del agua (m)	0,08	0,03	0,03
Espesor del lecho (m)	0,15	0,15	0,15
Número de orificios	16	25	25
Diámetro de Orificios (cm)	0,5	0,5	0,5

Los aireadores fueron construidos de acuerdo con el diseño planteado, sin embargo después de realizar la primera prueba hidráulica se pudo observar que los lechos no se inundaron lo suficiente debido a que el diámetro de los orificios era demasiado grande de modo que el agua se evacuaba muy rápido y no permitió un tiempo de contacto adecuado entre el lecho y el agua, incluso quedando partes del lecho casi secas; por lo cual se consideró conveniente realizar ajustes en el diseño para garantizar condiciones óptimas de funcionamiento.

El primer ajuste a realizar fue el cálculo experimental del área de orificios adecuado para garantizar una altura de agua de 15 cm aproximadamente o superior. Esto se logró calculando la altura del agua experimentalmente; primero se realizaron aforos para obtener el caudal de diseño que es 0,1 l/s y sobre este medir la altura del agua en las bandejas. Consecutivamente se taparon algunos

orificios del fondo de las bandejas y se midió la altura del agua en cada una de estas hasta obtener una altura aproximada de 15 cm, además fue necesario realizar interpolaciones para determinar el área requerida deseada. Los resultados se muestran en las Tablas 2.4, 2.5, 2.6, y 2.7.

Tabla 2.4. Área requerida en los orificios de la bandeja superior para garantizar diseño hidráulico del aireador de bandejas.

Altura del agua (cm)	Número de orificios	Área de orificios requerida (mm ²)
20	4	78,54
13,3	5	98,17
15,5	Por definir	91,78
16	Por definir	90,31

Tabla 2.5. Área requerida en los orificios de la bandeja intermedia para garantizar diseño hidráulico del aireador de bandejas.

Altura del agua (cm)	Número de orificios	Área de orificios requerida (mm ²)
Se rebota	4	78,54
13,3	5	98,17
15,0	Por definir	93,19
15,5	Por definir	91,72

Tabla 2.6. Área requerida en los orificios de la bandeja inferior para garantizar diseño hidráulico del aireador de bandejas.

Altura del agua (cm)	Número de orificios	Área de orificios requerida (mm ²)
Se rebota	4	78,54
13,4	5	98,17
15	Por definir	93,41
15,5	Por definir	91,92

Tabla 2.7. Número y diámetro de orificios escogidos para cada bandeja definidos experimentalmente

Bandeja	Número y diámetro de orificios
Bandeja superior	16 orificios Φ 1,85 mm
Bandeja intermedia	12 orificios Φ 2,7 mm + 9 orificios Φ 1,85 mm
Bandeja inferior	13 orificios Φ 2,7 mm + 7 orificios Φ 1,85 mm

El número y diámetro de orificios fue calculado en base a la interpolación obtenida de la prueba experimental mencionada anteriormente para obtener una altura del agua aproximada a 15 cm. Para la modificación del diseño de las bandejas fue necesario colocar placas de acrílico debidamente acopladas debajo de cada bandeja.

Una vez realizada la modificación, se hizo una prueba con el caudal de diseño para verificar la altura del agua, cuyos resultados no fueron los esperados debido a que la altura del agua fue inferior a los 15 cm, por lo que finalmente se decidió tapar algunos orificios hasta alcanzar una altura aproximada del agua. El diseño final se indica en la Tabla 2.8.

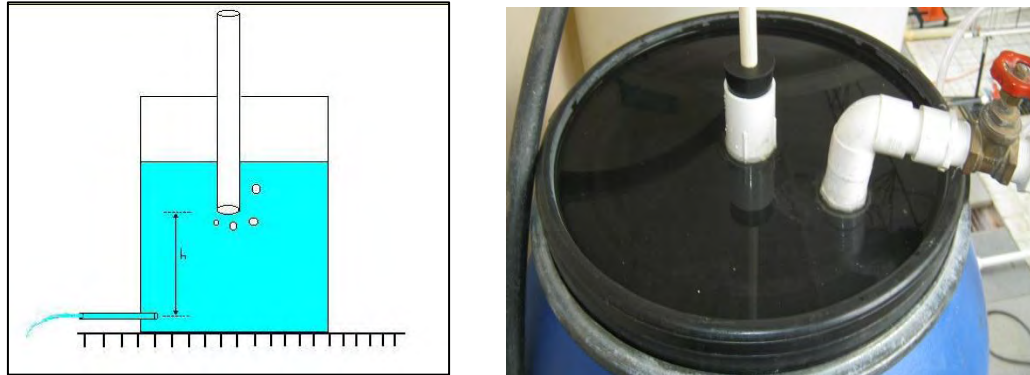
Tabla 2.8 Número y diámetro de orificios escogidos para el diseño final

Bandeja	Número y diámetro de orificios	Área requerida utilizada	Altura del agua (cm)
Bandeja superior	11 orificios Φ 2,7 mm	62,98	17
Bandeja intermedia	9 orificios Φ 2,7 mm + 9 orificios Φ 1,85 mm	75,72	14,7
Bandeja inferior	9 orificios Φ 2,7 mm + 7 orificios Φ 1,85 mm	70,34	14,6

2.3.1 Diseño del tanque elevado encargado de la distribución del agua hacia los aireadores. Para realizar la distribución del agua en el aireador previamente colocado en laboratorio se utilizó un tanque elevado, cuyo funcionamiento se basa en el frasco de Mariotte, el cual es un dispositivo destinado a conseguir una velocidad de vertimiento constante simultáneamente para un líquido y un gas. Este consta de un frasco con un orificio lateral cerca de la base en el que eventualmente puede insertarse un tubo recto horizontal, y un tubo, que por medio de un tapón ajusta perfectamente a su garganta, quedando en posición vertical.¹⁴ Inicialmente se coloca un tapón de corcho en el tubo horizontal para evitar la salida de líquido y se llena el frasco con agua, teniendo en cuenta que debe verse suficiente cantidad para cubrir ampliamente el extremo inferior del tubo vertical, y que este debe quedar siempre a una altura h por encima del nivel marcado por el tubo horizontal. En ese momento se quita el tapón de corcho y se observa la salida de agua a través del tubo horizontal con velocidad constante, a pesar de que con el paso del tiempo desciende el nivel de agua en el frasco.¹⁷

¹⁷ Tubo de Mariotte [En línea]. [Citado junio de 2013]. Disponible en internet <http://www4.ujaen.es/~jamaroto/F21.HTML>

Figura 2.1. Frasco de Mariotte teórico y en laboratorio



A la izquierda de la figura se encuentra el frasco de Mariotte teórico y a la derecha se puede observar el frasco de Mariotte utilizado en el montaje del laboratorio, para el cual se usó un tubo de PVC de diámetro $\frac{1}{4}$ " y un corcho plástico con el fin de evitar que se entre en contacto con el aire, ambos insertados en la tapa plástica del tanque, la cual a su vez tenía un sello metálico a su alrededor para lograr la hermeticidad.

El tanque elevado utilizado tiene una capacidad de 500 L, y según el diseño realizado, la distancia entre el extremo inferior del tubo vertical y el orificio lateral del tanque debe ser de 18 cm. Los cálculos de esta distancia se encuentran en el Anexo B.

2.4 ADQUISICIÓN DE MATERIALES DEL LECHO FILTRANTE

2.4.1 Coque. Se adquirió inicialmente 10 kilos de material en el almacén Tecnopiscinas ubicado en la Carrera 21 No. 14-01, Las Américas, Pasto – Nariño. Sin embargo, por razón de costos se optó por adquirir 50 kilos más con las mismas características en el almacén HIDROPURA S.A ubicado en la Cra 1 N. 20 – 20, Cali – Valle del Cauca. El coque viene en la siguiente presentación:

Fotografía 2.1. Coque



Debido a la gran diversidad de recomendaciones en cuanto al tamaño de partícula de material y teniendo en cuenta que el aireador de bandejas construido por los estudiantes fue realizado a escala, es recomendable usar diámetros de partículas adecuadas al tamaño de las bandejas de aireador, por lo cual se definió que los tamaños adecuados a usar estarían entre $\frac{1}{2}$ " a 1".

Para conseguir la granulometría deseada fue necesario triturar el coque manualmente, utilizando un cincel y un maso como se observa en las siguientes fotografías.

Fotografía 2.2. Trituración del Coque



Fotografía 2.3. Coque triturado



Se realizaron algunas pruebas que mostraron que el coque absorbe gran cantidad de agua por su alta porosidad, por lo tanto, se decidió tomar tamaños de partículas no tan pequeños que por concepto de área específica serían más adecuados, pero según las observaciones en laboratorio se pudo determinar que si se parte una partícula de coque mojada a la mitad, este se satura también en su parte interna.

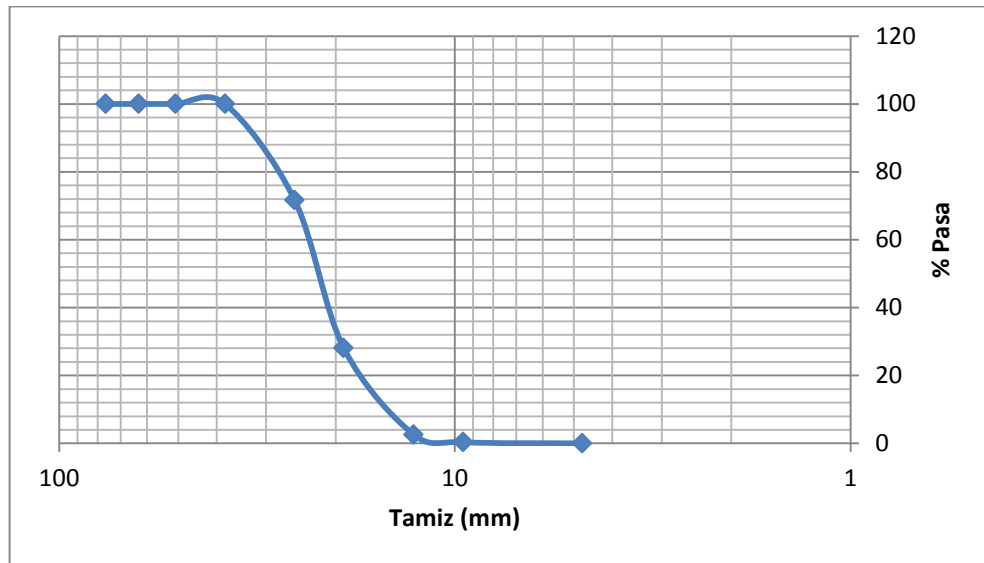
Para este material no se realizó el ensayo de granulometría debido a que es muy poroso y se desmorona con facilidad, por lo cual después de la trituración se optó por realizarle un tamizado y utilizar el material que pase de 1" y se retenga en el tamiz de 1/2". Al observar en las pruebas hidráulicas realizadas que de este material se desprende una capa grisácea de polvillo y una especie de aceite, se dejó 5 minutos de lavado del material con el agua del pozo antes de iniciar el ensayo, con un caudal de 0,05 l/s

2.4.2 Grava. El material fue adquirido en la cantera ubicada en el km 2 de la vía a Genoy, y se realizó el siguiente protocolo de preparación:

- Tamizado de las partículas por el tamiz de 1/2" tomando todo el material retenido para el experimento.
- Lavado del material con agua del acueducto
- Secado del material en el horno durante 24 horas a una temperatura de 110 ± 5 °C.

A este material se le realizó el ensayo de granulometría y peso específico. En cuanto al ensayo de granulometría los datos y el procedimiento realizado se indican en el Anexo C. La curva granulométrica, se indica a continuación: (grafica 2.1)

Gráfica 2.1. Curva Granulométrica de la grava



De la anterior curva granulométrica se obtuvo:

$D_{10} = 14,56$ mm

$D_{30} = 19,37$ mm

$D_{60} = 23,72$ mm

En el Anexo C se calcularon el coeficiente de uniformidad y el de curvatura, resultando 1,63 y 1,09 respectivamente. Lo cual indica que la grava a utilizar presentó tamaños de partículas muy uniformes y que no faltan series de diámetros entre el D_{10} y el D_{60} .

Teniendo en cuenta las recomendaciones del Departamento de Fiscalización del Instituto Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados (INAA)⁷, se decidió utilizar el material que pasa el tamiz de 1" hasta lo retenido en el tamiz de 1/2".

En cuanto al ensayo de gravedad específica y porcentaje de absorción, los datos y el procedimiento realizado se indican en el Anexo C.

Tabla 2.9. Resultados de gravedad específica y porcentaje de absorción para la grava

Muestra	Gravedad específica bulk	Gravedad específica bulk sss	Gravedad específica aparente	% Absorción
1	2,59	2,64	2,73	1,93
2	2,04	2,08	2,13	1,99
3	2,55	2,61	2,70	2,19
4	2,46	2,54	2,69	3,58
5	2,59	2,63	2,70	1,54

Observando los resultados de porcentaje de absorción de las distintas muestras tomadas para la grava en la Tabla 10, se puede decir que esta tiene una baja cantidad de poros y por lo tanto baja capacidad de absorción, sin embargo se probó como lecho para determinar su eficiencia dentro del sistema de aireadores de bandejas.

2.5 CONSTRUCCIÓN DEL AIREADOR DE BANDEJAS

Los aireadores de bandejas se mandaron a construir de acuerdo con el diseño realizado, utilizando como material de construcción el acero galvanizado por su economía y por la resistencia a la oxidación necesaria para la realización del experimento, los aireadores se pueden observar en la siguiente fotografía 2.4.

Fotografía 2.4. Aireadores de bandejas



2.5.1 Acoplamiento del montaje en el laboratorio y bases de funcionamiento transporte del agua. La extracción del agua del pozo y su traslado al tanque dentro del vehículo de transporte se realizó muy cuidadosamente para evitar aireación en el agua. Luego el traslado del agua de este tanque al tanque de almacenamiento se realizó por sifoneo y no por bombeo con el objetivo de no alterar las condiciones iniciales del agua.

Tanque de almacenamiento: Se utilizó un tanque con capacidad de 1000 l prestado por los laboratorios de Ingeniería en Producción Acuícola de la Universidad de Nariño. Este tanque fue utilizado para almacenar el agua proveniente del vehículo encargado de transportar el agua, además a este tanque fue conectada una bomba sumergible la cual permitió subir el agua hasta el tanque de distribución. Aunque se deseaba eliminar el sistema de bombeo, esta fue la opción más favorable por razones de seguridad.

Tanque de distribución: Se utilizó un tanque de 200 l de capacidad el cual está elevado a una altura de 2,8 m del piso y está apoyado sobre una viga, en este se instaló el tubo de Mariotte para garantizar un caudal constante. En la parte inferior lateral del tanque fue instalada una manguera de diámetro $\frac{3}{4}$ " la cual se encargó de conducir el agua hasta el aireador, conectada a una tubería con orificios para garantizar la distribución adecuada del agua en el mismo.

Los dos aireadores no trabajaron en paralelo sino uno a continuación del otro dado que la instalación en paralelo implicaba la división de caudales pudiéndose presentar caminos preferenciales del flujo y además por mayor facilidad para la adecuación del montaje.

En el Anexo E se puede observar las mediciones de oxígeno disuelto que se realizaron en el preensayo para coque y grava, las cuales fueron tomadas en los siguientes puntos:

- Dentro del pozo o aljibe de la Universidad Mariana.
- A la salida del grifo, después de bombear el agua desde el pozo hasta este.
- En el tanque de transporte antes de llevar el agua hasta la Universidad de Nariño.
- En el tanque de almacenamiento después de sifonear el agua desde el tanque de transporte.

Según lo anterior se concluye que el oxígeno disuelto dentro del pozo fue muy bajo, sin embargo a partir del bombeo del agua al tanque de transporte este se incrementó considerablemente por efecto del bombeo del agua y su contacto con la atmósfera, es por ello que para transportar el agua desde el tanque de transporte al de almacenamiento se prefirió utilizar sifoneo. Además, por la notoria introducción de oxígeno en el agua se decidió tomar medidas de oxígeno disuelto a la entrada del aireador y a la salida del mismo.

2.6 REALIZACIÓN DE ENSAYOS PARA LOS DIFERENTES LECHOS

2.6.1 Prueba hidráulica. Antes de dar inicio a los ensayos se realizó una prueba hidráulica con el fin de determinar las variaciones del caudal de diseño, ya que se requería que este caudal se mantuviera constante; y en segundo lugar se realizó esta prueba hidráulica con el fin de establecer un protocolo a seguir cuando se dé inicio a los ensayos.

2.6.1.1 Primera prueba para comprobar que el caudal es constante. Para determinar si el caudal de diseño se mantuvo constante, al realizar la prueba hidráulica se utilizó un solo aireador puesto que se deseaba comprobar si la instalación del tanque elevado con el tubo de Mariotte mantenía el caudal constante durante el desarrollo experimental, para ello se utilizó agua de acueducto con un lecho de grava y se tomaron 10 aforos a los que se les realizó

los cálculos correspondientes a las siguientes fórmulas estadísticas, según lo recomienda Salkind (México, 1999):

Promedio¹⁵:

$$X_m = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad [5]$$

Donde:

X_m: Promedio

X_i: Dato de la muestra

n: Número total de datos

Varianza¹⁵:

$$Sx^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2 * n_i}{n} \quad [6]$$

Donde:

Sx²: Varianza

X_i: Dato de la muestra

X_m: Promedio

n_i: frecuencia del dato de la muestra

n: Número total de datos

Desviación estándar¹⁸:

$$\sigma = \sqrt{Sx^2} \quad [7]$$

σ: Desviación estándar

Sx²: Varianza

Los resultados de los aforos se presentan en la Tabla 2.10.

Altura tubo de Mariotte: 15 cm

¹⁸ SALKIND, NEIL J., Métodos de investigación, México D.F, 1999, pp. 168, 171. [En línea]. [Citado marzo de 2013]. Disponible en internet: <http://books.google.com.co/books?id=ar&hl=es&sa=X&ei=nYFU8m4H8rmkAeX6oCgCA&ved=0CDAQ6AEwAQ#v=onepage&q=estadistica%20desviacion%20estandar&f=false>

Tabla 2.10. Aforos para comprobación del caudal de diseño

No.	Tiempo (s)	Volumen (ml)	Caudal (L/s)	$(X_i - x_m)^2$
1	2,98	127	0,0426	0,000000743
2	3,11	141	0,0453	0,000003454
3	3,02	129	0,0427	0,000000584
4	3,65	160	0,0438	0,000000127
5	2,8	127	0,0454	0,000003526
6	2,97	130	0,0438	0,000000085
7	2,8	123	0,0439	0,000000202
8	2,12	92	0,0434	0,000000007
9	2,55	104	0,0408	0,000007263
10	2,23	96	0,0430	0,000000185
		$\Sigma =$	0,4348	0,000016175

Tabla 2.11. Resultados de parámetros estadísticos

Promedio	0,0434793
Varianza	0,0000016
Desviación estándar	0,0012718

Al observar los resultados de los aforos y la tabla 2.11, se puede comprobar que el caudal se mantiene casi constante obteniéndose una desviación estándar de 0,002718 lo cual se acerca mucho a cero, por lo tanto la variación en el caudal es mínima.

2.6.1.2 Desarrollo de la prueba hidráulica. Después de comprobar que el caudal puede mantenerse casi constante con el sistema instalado en el laboratorio, se procedió esta vez a realizar la prueba hidráulica durante un periodo de 45 minutos para cada aireador de bandejas.

El objetivo de esta prueba fue verificar la altura del agua en cada bandeja con el caudal de diseño es decir 0,1 l/s, durante un periodo de 45 minutos y a la vez determinar los caudales y su variación mediante la realización los respectivos aforos. Para que el sistema funcione durante 45 minutos fue necesario llenar el tanque de distribución 2 veces debido a que este tiene una capacidad de 200 L, además mientras el tanque se llenaba los aireadores de bandejas no dejaron de funcionar, por lo cual mientras este tanque se llenaba también se realizaron aforos para determinar el caudal.

La prueba fue llevada a cabo el día 23 de agosto del año 2013 para los dos aireadores y se utilizó agua de acueducto. Igualmente, se calculó la desviación estándar a los aforos realizados.

Los resultados de la prueba hidráulica se encuentran en el Anexo D.

Como resultado de esta prueba hidráulica se obtuvo que las alturas del agua en las bandejas para el aireador 1 fueron en promedio de 17,2 cm, 15,0 cm y 14,6 cm; para el aireador 2 fueron de 16,0 cm, 15,4 cm y 15,5 cm para la bandeja superior, intermedia e inferior respectivamente. Por lo cual se puede decir que el sistema funciona correctamente puesto que se esperaba una altura aproximada de 15 cm en cada bandeja.

2.6.1.3 Protocolo hidráulico. Después de realizar las pruebas hidráulicas se estableció el siguiente protocolo hidráulico de funcionamiento del sistema:

Llenado de tanque de 1 m³ para el transporte del agua: Esta actividad se deberá hacer con mucho cuidado teniendo en cuenta que el agua debe llegar al laboratorio de hidráulica lo menos aireada posible puesto que ya existe una introducción de oxígeno desde el bombeo hasta que llega al tanque.

Transporte del agua: De igual manera se debe realizar con sumo cuidado para evitar la introducción de oxígeno y también para evitar que esta se riegue durante el transporte.

Llenado de tanque de distribución: Esta actividad será realizada con ayuda de una bomba sumergible la cual permitirá llevar el agua desde el tanque de almacenamiento hasta el tanque de distribución.

2.6.2 Preensayo. Teniendo en cuenta las recomendaciones del revisor de tesis, Ingeniero Iván Sánchez, docente de la Universidad de Nariño, se realizó un preensayo para coque y para grava con el fin de determinar si la eficiencia del sistema varía en función del tiempo; para ello se transportó 1 m³ de agua del aljibe que permitió mantener el sistema en funcionamiento durante 2,7 horas. Se deseaba mantener funcionando el sistema durante 3 horas pero por la dificultad de transportar este volumen de agua y además por las restricciones de la cantidad máxima de agua a extraer por día según el permiso solo se pudo transportar 1 m³ de agua. El preensayo fue realizado el día 16 de septiembre de 2013, en horas de la mañana para la grava y en la tarde para el coque. El agua fue transportada desde el aljibe de la Universidad Mariana hasta la Universidad de Nariño a las 07:00 am para grava y nuevamente a las 02:00 pm para el coque.

Los parámetros medidos para ambos lechos de contacto fueron oxígeno disuelto, temperatura, pH, hierro, manganeso y color. Los resultados del preensayo y de cada parámetro medido se encuentran en el Anexo E.

Oxígeno Disuelto y temperatura: Estos parámetros fueron medidos con un oxímetro. Del Anexo E se concluye que el oxígeno disuelto en el agua se incrementa en gran medida desde que el agua está dentro del pozo de la Universidad Mariana hasta que se extrae y finalmente llega al tanque de almacenamiento. Lo anterior puede producirse porque el agua se extrae del pozo utilizando una bomba la cual le introduce oxígeno, además el agua está en contacto directo con la atmósfera al ser transportada desde la Universidad Mariana hasta la Universidad de Nariño.

pH: Fue medido con cinta de papel medidora de pH debido a que el pH-metro con que cuenta el laboratorio de hidráulica aún no estaba calibrado, sin embargo se resalta que posteriormente en la realización de los ensayos, el pH se midió con el pH-metro. Del Anexo E se concluye que el pH del agua a la entrada y a la salida del aireador no varía, por lo cual el sistema no influye en el aumento o disminución del mismo, sin embargo se debe tener en cuenta que la cinta medidora de pH da un valor aproximado mas no exacto, por lo cual lo ideal sería medir este parámetro con más exactitud utilizando un pH-metro.

Color: Este parámetro fue medido con un colorímetro el cual permitió medir la absorbancia de las muestras de agua, por lo cual los resultados obtenidos fueron transformados a unidades de platino cobalto (UPC) mediante la siguiente ecuación:

$$Color = -0,476 + (1835,65 * absorbancia) \quad [8]$$

Para cada muestra a analizar se deben realizar 5 lecturas debido a que así lo indica el equipo y al final promediar los resultados. Del Anexo E se concluye en primera instancia que el agua tiene más color a la salida del aireador que a la entrada del mismo después de 1 hora de funcionamiento del sistema, esto pudo ocurrir porque la grava y el coque le otorga color al agua después de que esta hace su recorrido por el aireador de bandejas debido a que puede contener material arcilloso que se mantuvo pegado a la misma. A las dos y tres horas de funcionamiento se puede observar que los niveles de color en el agua suben respecto a la primera hora, esto pudo ser causado debido a que el agua es de aljibe y que al entrar en contacto con la atmósfera se produce el fenómeno de oxidación por lo cual el agua cambia a un color amarillento.

Hierro y manganeso: Se tomaron muestras de agua para analizar estos parámetros a la entrada al aireador de bandejas con el fin determinar la concentración inicial de hierro y manganeso que contiene el agua; también a la salida del aireador a la primera hora, a las dos horas y a las 2,7 horas, para

determinar si a medida que el tiempo transcurre el sistema remueve cada vez más hierro y manganeso o presenta una tendencia constante. Los resultados de los análisis realizados de hierro y manganeso se indican en el Anexo E. Después de analizar estos parámetros se puede concluir que la eficiencia de remoción de hierro y manganeso de la grava y del coque no incrementa con el tiempo o al menos en este periodo de prueba. Además, se puede observar claramente que la eficiencia de remoción del hierro es superior a la de manganeso en gran medida, esto probablemente se debe a que para remover manganeso se emplea precipitación a pH alto (>9,5).¹⁹

Aforos: Estos fueron realizados durante todo el desarrollo del preensayo, inicialmente para ajustar el caudal de diseño y posteriormente se tomaron mediciones cada 5 minutos para corroborarlo.

Debido a que el tanque encargado de distribuir el agua hacia el aireador de bandejas tiene una capacidad de 200 l, fue necesario llenarlo 5 veces, sin embargo, mientras este se llenaba, el aireador nunca dejó de trabajar aunque fue necesario cerrar la válvula hasta un punto definido debido a que cuando el tanque se llenaba el caudal aumentaba por lo cual se realizaron aforos para corroborar el caudal de diseño y evitar cambios bruscos en el flujo del líquido. El tiempo estimado de llenado del tanque fue de 3 minutos y 30 segundos aproximadamente como se determinó en la prueba hidráulica. Los resultados de los aforos se encuentran en el Anexo F.

De los aforos realizados en el preensayo se puede concluir que el caudal no presenta una gran variación y es estable durante el transcurso del preensayo; sin embargo se resalta que durante el llenado del tanque de distribución existe un pequeño incremento en el caudal que se trató de controlar mediante el uso de la válvula hasta alcanzar una altura predeterminada del agua en la bandeja que permita establecer que el caudal es el adecuado.

2.6.3 Desarrollo del experimento. Por recomendación del Ingeniero Iván Sánchez, revisor del trabajo de grado y con la asesoría del Magister en Estadística Álvaro Burbano Montenegro se decidió realizar algunos cambios en la metodología de realización de los ensayos dado que la planteada anteriormente no se ajustaba a ningún método estadístico conocido; se optó por trabajar con el método estadístico de mediciones repetidas el cual permite reducir costos y

¹⁹ VERA BRITO, Nancy, Instituto Politécnico Internacional, México D.F, Alternativas de potabilización para el agua que abastecerá a la ampliación del aeropuerto internacional de la ciudad de México, pp. 23. [En línea]. [Citado marzo de 2013]. Disponible en internet <http://www.slideshare.net/castillejofredy/alternatpotab>

tiempo al reducirse el número de ensayos requeridos garantizando un buen grado de confiabilidad.

Las medidas repetidas, se refieren en términos generales a los datos en que la respuesta de cada unidad experimental o sujeto es observado en múltiples ocasiones o bajo múltiples condiciones. El término "múltiple", por lo general significa "más de dos", ya que el tema de los pares de mediciones es abordado en muchos libros.

El término "mediciones repetidas" se utiliza para describir los datos recogidos durante un período de tiempo relativamente corto, frecuentemente bajo condiciones experimentales.

Para el desarrollo experimental del presente trabajo se utilizó un diseño experimental factorial donde el factor A corresponde al lecho con tres niveles que son grava, coque y la combinación de ambos

Además, se tuvo en cuenta el factor B correspondiente al tiempo de prueba también con tres niveles que son: día 1, día 2 y día 3. Este modelo experimental fue adoptado puesto que cada lecho de prueba pasó por las mismas unidades experimentales. Los datos fueron introducidos al paquete estadístico SPSS versión 20, para realizar el análisis de resultados, mediante los formatos que se encuentran en el Anexo G.

Para realizar el análisis de resultados, el factor estadístico que se tuvo en cuenta a parte de la media o promedio fue la **significancia** que con frecuencia es considerada la medida más importante en la interpretación de resultados de un experimento. En estadística, un resultado se denomina estadísticamente significativo cuando no es probable que haya sido debido al azar. Una "diferencia estadísticamente significativa" solamente significa que hay evidencias estadísticas de que hay una diferencia entre las variables estudiadas. No significa que la diferencia sea grande, importante, o significativa en el sentido estricto de la palabra, sólo indica que hay diferencias.²¹ En este caso una diferencia significativa se indica con valores de significancia menores a 0,05 ya que se tomó un grado de confianza del 95%.

El diseño experimental quedó de la siguiente forma:

Coque

	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9
Aireador 1									
Aireador 2									

Grava

	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9
Aireador 1									
Aireador 2									

Coque y Grava

	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9
Aireador 1									
Aireador 2									

La explicación del modelo es el siguiente: cada día trabajan dos unidades experimentales correspondientes a los dos aireadores, que son exactamente iguales, cada unidad experimental debe tener el mismo material durante 3 días para observar la eficiencia a lo largo de los mismos, tomándose 1 muestra por día a la entrada al aireador y a la salida del mismo después de 45 minutos de funcionamiento para analizar hierro y manganeso total. Finalizados los 3 días se cambia el material en cada aireador y se repite el anterior proceso completándose al final 6 unidades experimentales por cada lecho. Cabe destacar que aunque el material se cambia cada 3 días todo el material tuvo la misma procedencia, características granulométricas y el mismo protocolo de preparación para el ensayo.

También se recalca que para el desarrollo del experimento de coque más grava, la distribución se la realizó de la siguiente manera: 1 capa de 10 cm de coque distribuido en la base de la bandeja y una capa de 5 cm de grava colocado sobre el coque, esto con el fin de que este material no flote en el agua debido a que es poco denso. Realizada la anterior distribución se observó que el coque no flota. El anterior procedimiento se realizó en las 3 bandejas de cada aireador.

2.6.3.1 Parámetros analizados en el desarrollo de los ensayos. Durante el desarrollo de los ensayos se analizaron los parámetros indicados en la Tabla 2.12.

Tabla 2.12. Parámetros medidos para cada muestra de agua durante el desarrollo del experimento

Parámetro	Método y/o equipo
Hierro y manganeso	Espectrofotómetro por absorción atómica (Método de absorción atómica con flama o llama - Standard Methods) ²⁰
Oxígeno disuelto	Oxímetro
Color	Colorímetro
pH	pH-metro
Temperatura	Oxímetro
Presión atmosférica	barómetro

El análisis de hierro y manganeso se lo realizó mediante el método de Espectrofotometría por Absorción Atómica. Inicialmente se deseaba enviar las muestras a los Laboratorios Especializados de la Universidad de Nariño para el análisis de hierro y manganeso, sin embargo debido al gran número de muestras a analizar (216 muestras), los altos costos para el análisis de estas, la demora en la entrega de resultados por parte del laboratorio y por la posibilidad de prepararlas y analizarlas en los Laboratorios del SENA gratuitamente, la preparación y análisis de hierro se lo realizó en este Laboratorio por las estudiantes autoras del trabajo de grado, después de una capacitación realizada por parte del químico Edison Sánchez, quien es el encargado de este laboratorio. El SENA cuenta con modernos laboratorios y equipos, además el uso de reactivos y del equipo se realizó sin ningún costo. (ver fotografía 2.5)

Fotografía 2.5. Espectrofotómetro de absorción atómica del Laboratorio del SENA



²⁰ EATON, ANDREW, FRANSON, MARY ANN, Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater, American Public Health Association, 2005, pp. 531-543.

En cuanto al análisis de manganeso, la preparación de muestras se la realizó en los Laboratorios del SENA, sin embargo debido a que el Espectrofotómetro de Absorción Atómica con que cuentan no posee la lámpara para analizar manganeso, el análisis de las muestras se lo realizó en los laboratorios Especializados de la Universidad de Nariño, llevándose las muestras preparadas y solo para realizar las lecturas de este metal.

En el Anexo H se encuentran los formatos con los respectivos resultados de todos los parámetros medidos en el desarrollo del ensayo. (ver fotografía 2.6)

Fotografía 2.6. Espectrofotómetro de absorción atómica de los Laboratorios Especializados de la Universidad de Nariño



2.7 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

Los datos fueron analizados mediante el programa SPSS (Statistical Product and Service Solutions) versión 20, el cual es un conjunto de potentes herramientas de tratamiento de datos y análisis estadístico. Se resalta que el uso de este programa se realizó con la asesoría del Magister en Estadística Álvaro Burbano Montenegro debido a que él cuenta con esta licencia y por su idoneidad en el manejo del programa.

Para la interpretación de los resultados obtenidos mediante el programa, se debe tener en cuenta lo siguiente:

Factor A: Lecho, tiene tres niveles:

1. Grava
2. Coque
3. Coque y grava

Factor B: Tiempo, tiene tres niveles:

1. Día 1
2. Día 2
3. Día 3

2.7.1 Análisis de los resultados de eficiencia de remoción de hierro. Al observar los datos obtenidos del análisis estadístico (ver anexo I), se puede decir que no se presenta una diferencia o variación significativa estadística, en cuanto a las eficiencias obtenidas para la remoción de hierro, con respecto al lecho y tampoco respecto al tiempo. Es decir las diferencias son poco relevantes.

En la Tabla 2.13 se puede observar cual fue la media en cuanto a la remoción de hierro para cada uno de los lechos, el error típico y los límites tanto inferior como superior en los cuales la confianza es 95%. La Tabla 2.12 presenta una comparación de cada uno de los lechos respecto al tiempo y en base a esto se indica la eficiencia de remoción de hierro de cada lecho por día, indicando la media en cuanto a la eficiencia de remoción de este metal, el error típico y los límites inferior y superior de la eficiencia de remoción de este metal para que la confianza sea de 95%.

Tabla 2.13. Estimaciones estadísticas de cada lecho probado en cuanto a eficiencia de remoción de hierro

Lecho	Media	Error típ.	Intervalo de confianza 95%	
			Límite inferior	Límite superior
1	26,01	1,65	21,77	30,25
2	23,62	3,70	14,10	33,15
3	25,36	4,45	13,93	36,79

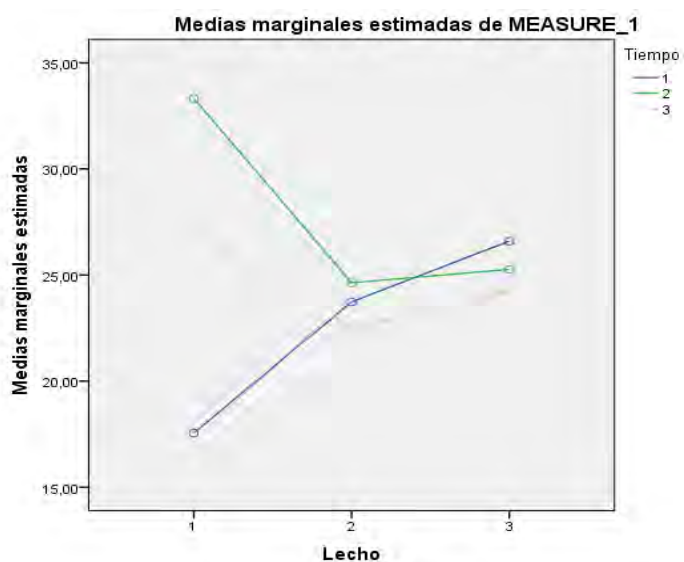
De la Tabla 2.13, se puede concluir de acuerdo a la media, que el lecho que mayor eficiencia de remoción de hierro presentó es el lecho 1 o sea el lecho de grava.

Tabla 2.14. Estimaciones estadísticas en cuanto a eficiencia de remoción de hierro teniendo en cuenta el lecho probado y el tiempo

Lecho	Tiempo	Media	Error típ.	Intervalo de confianza 95%	
				Límite inferior	Límite superior
1	1	17,55	2,82	10,31	24,79
	2	33,33	6,08	17,70	48,96
	3	27,16	5,09	14,09	40,23
2	1	23,73	7,46	4,55	42,91
	2	24,63	6,38	8,25	41,01
	3	22,51	4,83	10,09	34,93
3	1	26,60	6,14	10,82	42,38
	2	25,26	4,94	12,58	37,95
	3	24,22	4,00	13,92	34,52

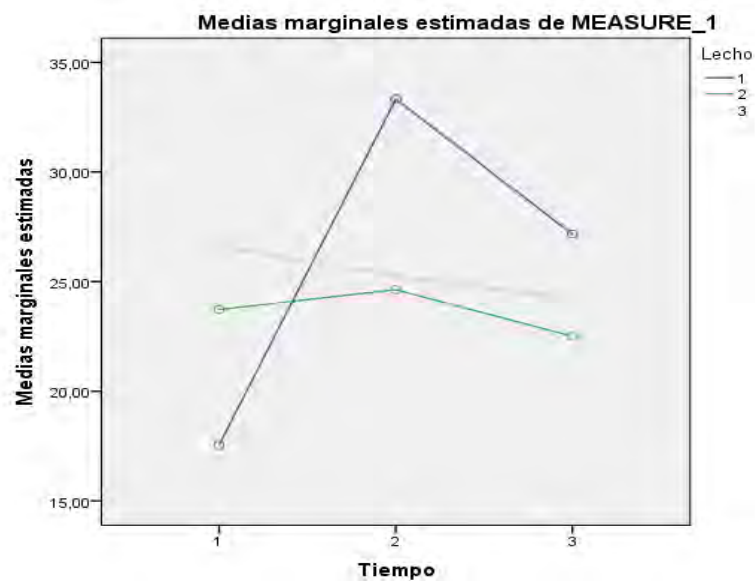
De la Tabla 2.14 se puede concluir en cuanto a la media, que para el lecho 1 osea grava, la mayor eficiencia de remoción de hierro se presentó en el día 2 con un 33,33%; en cuanto al lecho 2 osea coque, la mayor eficiencia de remoción de hierro se presentó en el día 2 con un 24,63% y en cuanto al lecho 3 osea coque y grava la mayor eficiencia de remoción de hierro se presentó en el día 1 con un 26,60%

Gráfica 2.2. Porcentaje de eficiencia de remoción del parámetro hierro evaluando por día los lechos de contacto



Analizando la Gráfica 2.2 se puede decir que en el día 1, se obtuvo mayor eficiencia con el lecho de coque y grava, en el día 2 con el lecho de grava y en el día 3 con el lecho de grava. Sin embargo, cabe destacar que aunque la grava presenta dos mejores eficiencias de remoción de hierro para los días 2 y 3, este lecho es el que presenta un comportamiento menos estable en el tiempo, lo que no ocurre con los lechos de coque y el de coque y grava, además entre estos dos últimos el que mejor comportamiento presenta es el de coque y grava.

Gráfica 2.3. Porcentaje de eficiencia de remoción del parámetro hierro evaluando cada lecho de contacto a lo largo del tiempo



Observando la Gráfica 2.3 se puede expresar que el lecho de grava tiene una alta eficiencia de remoción de hierro en el día 2, pero disminuye considerablemente en el día 3. El lecho de coque tiene un comportamiento parecido pero con menores eficiencias y el lecho de coque y grava presenta una mayor eficiencia de remoción en el día 1 pero va disminuyendo hasta el tercer día con una tendencia más estable.

En síntesis, para remoción de hierro el lecho que presenta mayor eficiencia de remoción es el de grava con una eficiencia de remoción de 26,01%, sin embargo, el que tiene un mejor comportamiento a lo largo del tiempo es el de coque y grava.

2.7.2 Análisis de los resultados de eficiencia de remoción de manganeso.

Según los datos obtenidos del programa en la eficiencia de remoción de manganeso si existe una variación significativa estadísticamente con respecto al tiempo de prueba.

Tabla 2.15. Estimaciones estadísticas de cada lecho probado en cuanto a eficiencia de remoción de manganeso

Lecho	Media	Error típ.	Intervalo de confianza 95%	
			Límite inferior	Límite superior
1	20,71	2,64	13,92	27,49
2	20,81	7,02	2,75	38,87
3	24,95	1,42	21,31	28,59

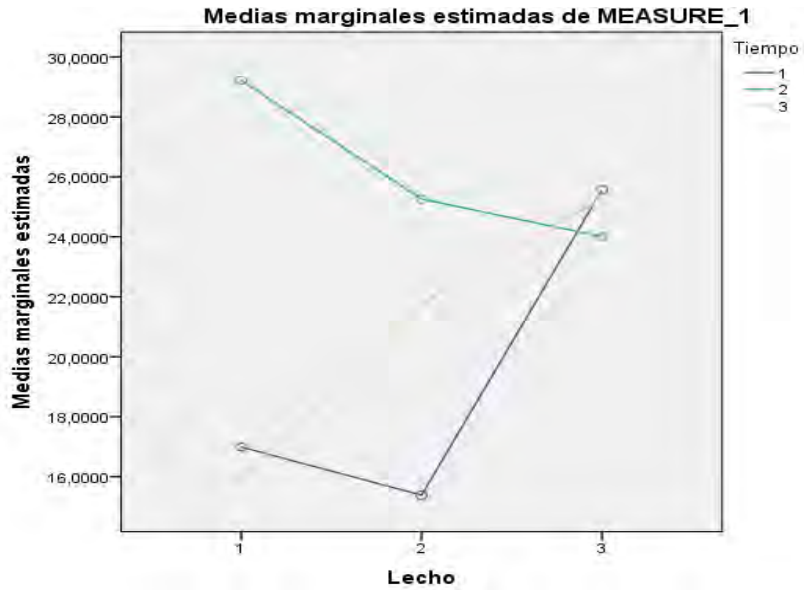
De la Tabla 2.15 se puede concluir de acuerdo a la media, que el lecho que mayor eficiencia de remoción de manganeso presentó es el lecho 3 o sea el lecho de coque y grava.

Tabla 2.16. Estimaciones estadísticas en cuanto a eficiencia de remoción de manganeso teniendo en cuenta el lecho probado y el tiempo

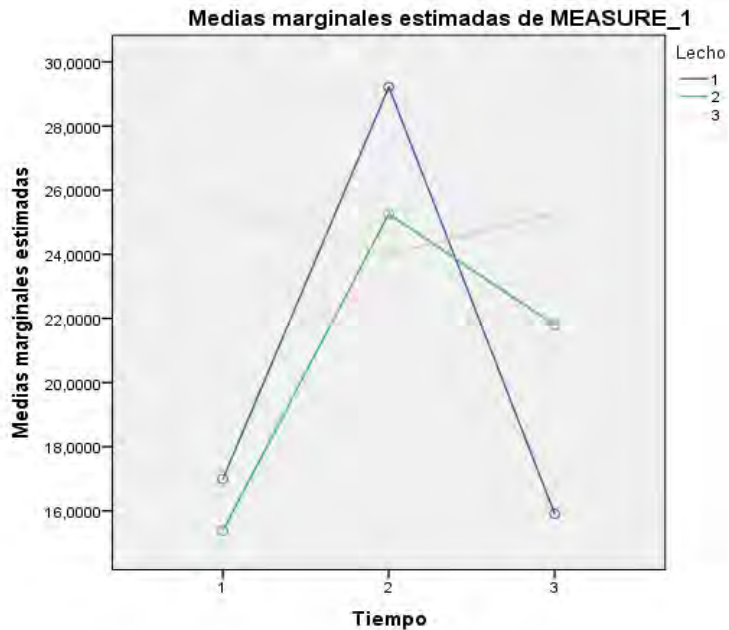
Lecho	Tiempo	Media	Error típ.	Intervalo de confianza 95%	
				Límite inferior	Límite superior
1	1	16,99	2,6	10,31	23,67
	2	29,22	6,48	12,55	45,89
	3	15,91	6,50	-0,79	32,61
2	1	15,38	4,18	4,63	26,13
	2	25,26	12,50	-6,88	57,39
	3	21,79	7,72	1,96	41,63
3	1	25,57	2,08	20,41	30,73
	2	24,01	1,63	19,81	28,20
	3	25,27	1,73	20,83	29,72

De la Tabla 2.16 se puede concluir en cuanto a la media, que para el lecho 1 o sea grava, la mayor eficiencia de remoción de manganeso se presentó en el día 2 con un 29,22%; en cuanto al lecho 2 o sea coque, la mayor eficiencia de remoción de manganeso se presentó en el día 2 con un 25,26% y en cuanto al lecho 3 o sea coque y grava la mayor eficiencia de remoción de manganeso se presentó en el día 1 con un 25,57%.

Gráfica 2.4. Porcentaje de eficiencia de remoción del parámetro manganeso evaluando por día los lechos de contacto



Gráfica 2.5. Porcentaje de eficiencia de remoción del parámetro manganeso evaluando cada lecho de contacto a lo largo del tiempo



Observando la Gráfica 2.4 se puede decir que en cuando a remoción de manganeso, en el día 1 el lecho más eficiente fue el de coque y grava, en el día 2 el lecho de grava presentó alta eficiencia y en el día 3 el de mayor eficiencia fue el lecho de coque y grava. Además de esto, analizando la Gráfica 2.5 se puede

inferir que a pesar de que el lecho de grava presenta una mayor eficiencia en el día 2, esta cae considerablemente en el día 3, por ello el lecho que presenta una tendencia más estable a lo largo del tiempo es el de coque y grava.

Teniendo en cuenta los resultados de la investigación realizada por Helem Salazar y July Ordoñez en su trabajo de grado titulado “Evaluación de lechos de contacto en aireadores de bandeja en la empresa de concentrados de Solla en el municipio de Pasto” de la Universidad Mariana donde la eficiencia de remoción de hierro para el lecho de rocas de río fue de 12,58%, para el lechos de esferas de cerámica de 15,96% y para el lecho de antracita del 27,64%, estos lechos fueron probados con un caudal de 0,1 l/s y una carga hidráulica de 115,2 m³/m²xdía, utilizando solo dos bandejas de aireación²¹. Comparando estos valores con los resultados obtenidos en la presente investigación los cuales fueron: para el lecho de grava 26,01%, para el lecho de coque 23,62% y para el lecho de coque y grava fue de 25,36%, se puede decir que los resultados de la presente investigación no presentan diferencias significativas estadísticamente y a pesar de que se utilizaron 3 bandejas de aireación garantizándose una altura de agua suficiente para cubrir el lecho de contacto en cada bandeja, lo cual no se tuvo en cuenta en la investigación base de comparación, el porcentaje de remoción de hierro con el lecho de antracita fue superior a los lechos probados por lo cual sería una buena alternativa probar este lecho garantizando mejores condiciones de funcionamiento hidráulico del aireador y probando con un número mayor de bandejas.

Los resultados de remoción de hierro obtenidos para el lecho de grava se pueden comparar con los obtenidos para el lecho de rocas de río que presenta características similares aunque menor porosidad, observándose que la eficiencia de remoción de este último lecho fue considerablemente menor con un porcentaje de 12,58% comparado con un 26,01%, esto debido a que se probó con una bandeja más y se garantizó una altura de agua que cubra el lecho de contacto. En cuanto a remoción de manganeso en el trabajo de grado base de comparación, la eficiencia de remoción para el lecho de rocas de río fue de 20,88%, para esferas de cerámica 23,05% y para antracita de 35,09%. Comparando estos valores con los resultados obtenidos en la presente investigación, los cuales fueron: para el lecho de grava 20,71%, para el lecho de coque 20,81% y para el lecho de coque y grava fue de 24,95%, se puede decir que igual que en el anterior caso el lecho de antracita presentó mejores resultados.

Comparando el resultado de remoción de manganeso obtenido para el lecho de grava de 20,71% con el alcanzado para el lecho de rocas de río con 20,88%, se puede observar que la eficiencia de remoción de ambos lechos fue similar, probablemente debido a que la fuente con la cual trabajaron presentaba niveles

²¹ Salazar, Helem; Ordoñez July, Evaluación de lechos de contacto en aireadores de bandeja en la empresa de concentrados de Solla en el Municipio de Pasto, Universidad Mariana, Colombia, 2010, pp. 50-93.

superiores de manganeso a la fuente base de investigación de este trabajo de grado, lo cual puede favorecer la reacción catalizadora para la remoción de manganeso.

Respecto a la remoción de hierro es posible alcanzar una eficiencia mayor. Según el trabajo de grado de Mauricio Biron Narváez Hernández de la Escuela Superior Politécnica del Chimborazo²², quien realizó un diseño de aireadores de bandejas que suponen una eficiencia del 70% al 80% y con una efectividad del 80% al 90%, utilizando una carga hidráulica de 518,40 m³/m².día, una altura del aireador de 2 m y con 6 bandejas de aireación espaciadas a 0,40 m. Esto en comparación con la mayor eficiencia de remoción lograda en el presente estudio de 26,01% para el lecho de grava, demuestra que es recomendable la utilización de más de tres bandejas de aireación.

2.7.3 Análisis de los resultados de oxígeno disuelto:

Tabla 2.17. Estimaciones estadísticas de cada lecho probado en cuanto a oxígeno disuelto

Lecho	Media	Error típ.	Intervalo de confianza 95%	
			Límite inferior	Límite superior
1	13,64	0,68	11,91	15,37
2	9,84	0,93	7,46	12,22
3	10,61	0,13	10,27	10,94

De la Tabla 2.17 se puede concluir de acuerdo a la media, que el lecho que permitió una mayor introducción de oxígeno disuelto en el agua fue el lecho 1 o sea el lecho de grava con 13,64%.

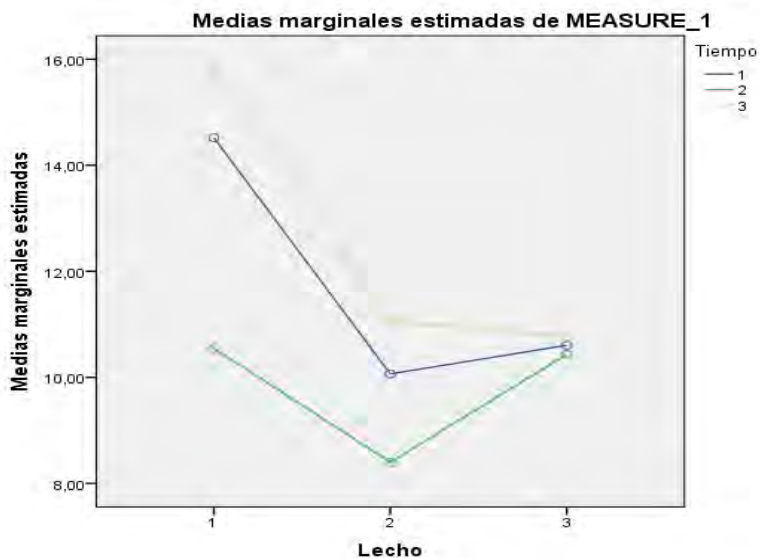
²² NARVÁEZ HERNANDEZ, Mauricio Biron, Diseño de un sistema potabilización a partir de un agua subterráneas, para la planta de los Álamos de la ciudad de Francisco de Orellana, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, pp. 75. [Documento electrónico, Online]. [Citado marzo de 2013]. Disponible en internet <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/686/1/96T00140.pdf>

Tabla 2.18. Estimaciones estadísticas en cuanto a oxígeno disuelto

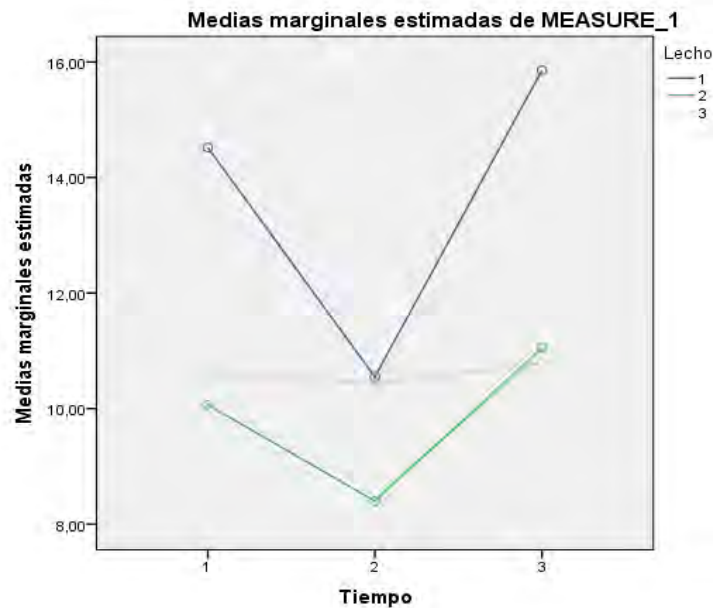
Lecho	Tiempo	Media	Error típ.	Intervalo de confianza 95%	
				Límite inferior	Límite superior
1	1	14,52	1,14	11,59	17,45
	2	10,55	1,45	6,82	14,28
	3	15,86	1,97	10,79	20,92
2	1	10,07	2,38	3,95	16,18
	2	8,40	0,68	6,66	10,14
	3	11,06	1,14	8,12	13,99
3	1	10,61	0,20	10,09	11,12
	2	10,43	0,14	10,08	10,79
	3	10,78	0,11	10,50	11,06

De la Tabla 2.18 se puede concluir en cuanto a la media, que para el lecho 1 osea grava, la mayor introducción de oxígeno disuelto se presentó en el día 3 con un 15,86%; en cuanto al lecho 2 osea coque, la mayor introducción de oxígeno disuelto se presentó en el día 3 con un 11,06% y en cuanto al lecho 3 osea coque y grava también se presentó en el día 3 con un 10,78%.

Gráfica 2.6. Medias estimadas para el parámetro oxígeno disuelto evaluando por día los lechos de contacto



Gráfica 2.7. Medias estimadas para el parámetro oxígeno disuelto evaluando cada lecho de contacto a lo largo del tiempo



En cuanto a eficiencia de aireación basada en la medición de oxígeno disuelto medido a los 20 y 40 minutos de funcionamiento del sistema, para posteriormente sacar un promedio para cada día de la unidad experimental correspondiente, y con el cual se realizó el análisis estadístico (Ver Anexo G), se puede decir que sí se observó una variabilidad significativa desde el punto de vista estadístico con respecto al tiempo y al lecho de prueba.

Observando las Gráficas 2.6 y 2.7, los tres lechos presentan comportamientos similares con respecto al tiempo de prueba, así para el día 1, el lecho más eficiente fue el de grava, para el día 2 fue también el de grava y para el día 3 fue el de coque y grava. Teniendo en cuenta la Gráfica 2.7, el lecho de grava en el día 1 presenta una elevada eficiencia que baja en el día 2 notablemente y vuelve a subir en el día 3. El coque tiene un comportamiento similar pero con menores eficiencias, mientras que el lecho de coque y grava presenta un comportamiento más o menos estable a lo largo del tiempo.

2.7.4 Análisis de los resultados de eficiencia de remoción de color. Como se puede observar en las Tablas 2.19 y 2.20 los datos de eficiencia de remoción de color en su mayoría fueron negativos porque se introdujo color al agua utilizada en el laboratorio, si presentaron una variabilidad significativa estadísticamente respecto al lecho y al tiempo.

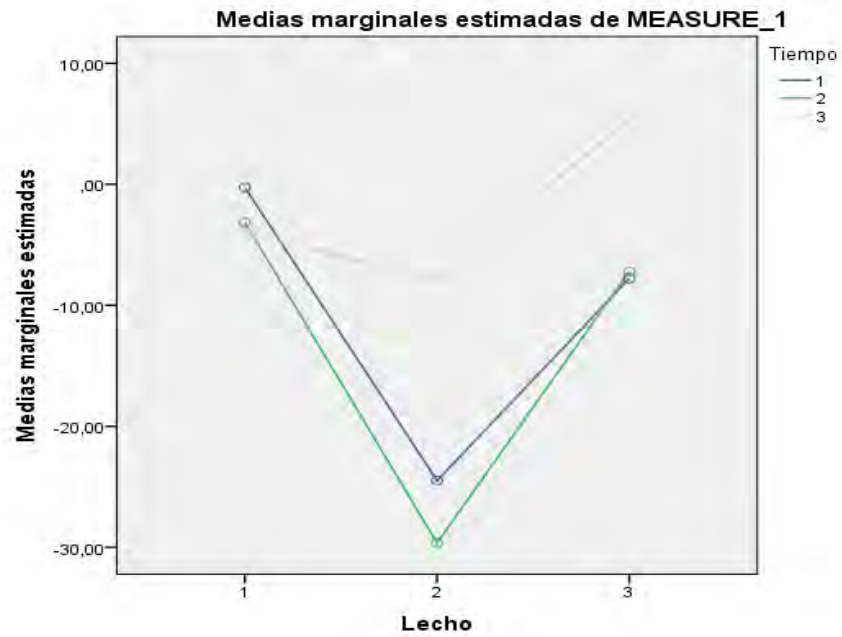
Tabla 2.19. Estimaciones estadísticas de cada lecho probado en cuanto a eficiencia de remoción de color

Lecho	Media	Error típ.	Intervalo de confianza 95%	
			Límite inferior	Límite superior
1	-2,46	2,61	-9,18	4,26
2	-20,65	3,95	-30,80	-10,50
3	-3,20	1,87	-8,01	1,60

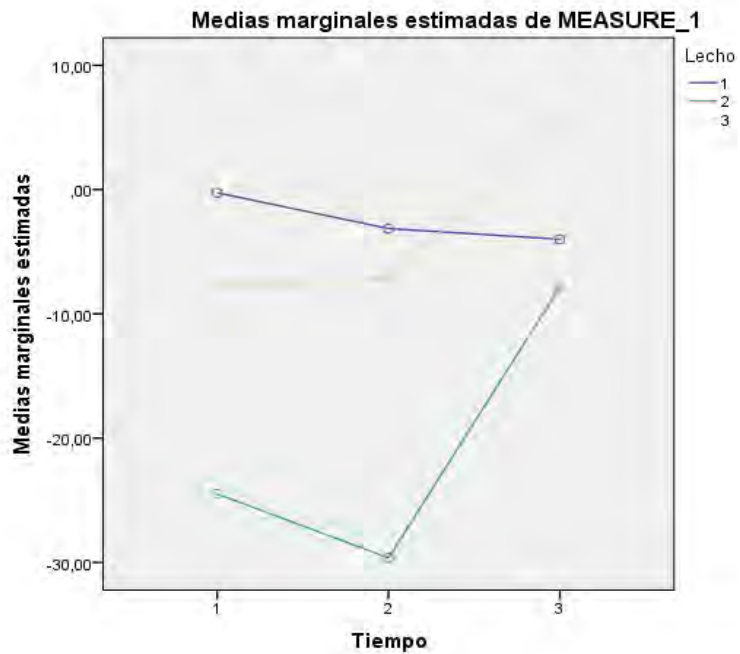
Tabla 2.20. Estimaciones estadísticas en cuanto a eficiencia de remoción de color teniendo en cuenta el lecho probado y el tiempo

Lecho	Tiempo	Media	Error típ.	Intervalo de confianza 95%	
				Límite inferior	Límite superior
1	1	-0,25	6,25	-16,32	15,81
	2	-3,13	1,74	-7,59	1,33
	3	-3,99	4,87	-16,50	8,51
2	1	-24,49	9,70	-49,42	0,44
	2	-29,64	6,63	-46,68	-12,60
	3	-7,82	7,76	-27,76	12,12
3	1	-7,78	2,80	-14,97	-0,59
	2	-7,21	2,74	-14,24	-0,18
	3	5,38	4,00	-4,89	15,65

Gráfica 2.8. Porcentaje de eficiencia de remoción del parámetro color evaluando por día los lechos de contacto



Gráfica 2.9. Porcentaje de eficiencia de remoción del parámetro color evaluando cada lecho de contacto a lo largo del tiempo



Observando las Gráficas 2.8 y 2.9 se infiere que a lo largo de los 3 días de prueba el lecho que más color introduce al agua es el de coque, siguiéndole el lecho de coque y grava, aunque este último al tercer día logra remover color en un pequeño porcentaje. Al parecer, la grava se empieza a ensuciar poco a poco introduciéndole color al agua a medida que pasa el tiempo, pero tiene un comportamiento casi estable en cuanto a eficiencia de remoción de este parámetro.

2.7.5 Análisis de los resultados de la variación de pH:

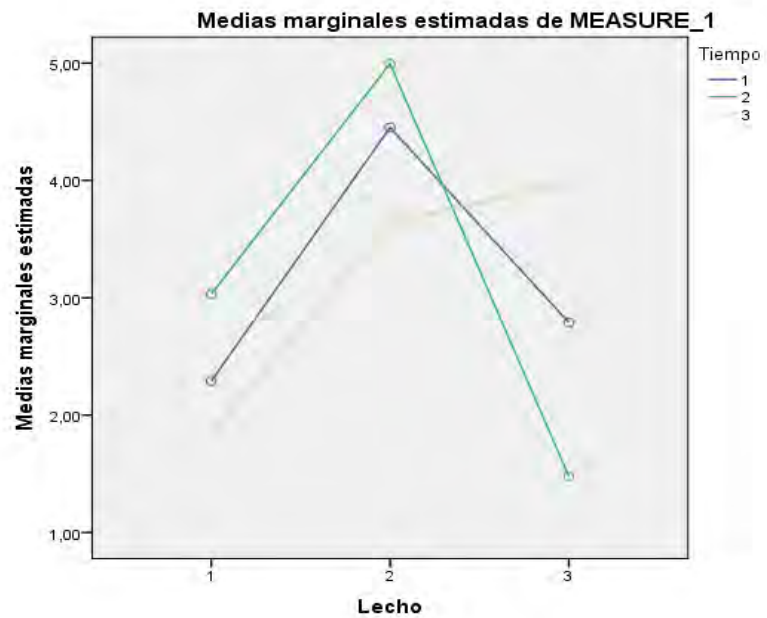
Tabla 2.21. Estimaciones estadísticas de cada lecho probado en cuanto a variación de pH

Lecho	Media	Error típ.	Intervalo de confianza 95%	
			Límite inferior	Límite superior
1	2,39	0,62	0,79	4,00
2	4,36	0,75	2,44	6,29
3	2,75	0,46	1,58	3,92

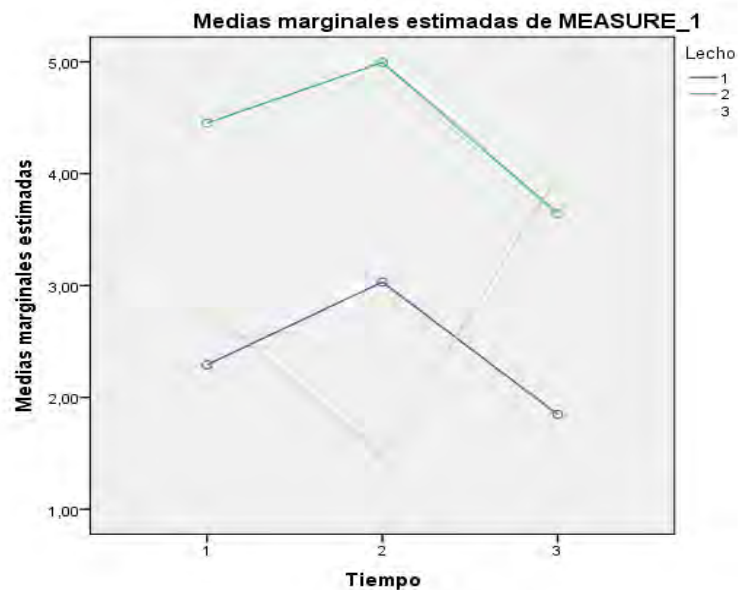
Tabla 2.22. Estimaciones estadísticas en cuanto a variación de pH teniendo en cuenta el lecho probado y el tiempo

Lecho	Tiempo	Media	Error típ.	Intervalo de confianza 95%	
				Límite inferior	Límite superior
1	1	2,29	0,72	0,45	4,13
	2	3,03	1,23	-0,12	6,19
	3	1,85	0,72	0,001	3,70
2	1	4,45	1,66	0,18	8,72
	2	5,00	1,13	2,10	7,89
	3	3,64	0,77	1,66	5,63
3	1	2,79	0,47	1,59	3,99
	2	1,48	0,83	-0,65	3,60
	3	3,98	0,46	2,81	5,16

Gráfica 2.10. Porcentaje de variación de pH evaluando por día los lechos de contacto



Gráfica 2.11. Porcentaje de variación de pH evaluando cada lecho de contacto a lo largo del tiempo



Observando las Tablas 2.21 y 2.22 se puede inferir que el porcentaje de elevación de pH no tiene una variabilidad significativa desde el punto de vista estadístico con respecto al tiempo ni al lecho.

Observando las Gráficas 2.10 y 2.11, se puede decir que el lecho de coque eleva más el pH que el lecho de grava y que los dos presentan un comportamiento similar siendo mayor la eficiencia de elevación de pH en el día 2 y observando que el lecho de coque está por encima del lecho de grava. En lugar de esto el lecho de coque y grava presenta una tendencia diferente observándose que en el día 2 el pH disminuye con respecto al día 1 y vuelve a aumentar en el día 3.

A parte de lo anterior se puede observar que para los lechos de coque y la grava cuando se aumentó el pH especialmente en el día 2, también se aumentó la eficiencia de remoción de hierro y de manganeso.

Realizando un análisis general en cuanto a remoción de hierro y manganeso, se puede decir que el lecho que alcanzó mayor remoción de hierro fue el de grava, pero el más eficiente en cuanto a remoción de manganeso fue el de coque y grava.

Así mismo, se puede resaltar que el lecho que presentó mejor comportamiento con respecto al tiempo en cuanto a remoción de hierro y manganeso fue el lecho de coque y grava, puesto que el de grava presenta la mayor eficiencia en promedio más en el día 3 la eficiencia baja considerablemente, mientras que el lecho de coque y grava mantiene unas eficiencias más estables y de mejor tendencia.

2.8 APLICABILIDAD DEL SISTEMA EN ZONAS RURALES DEL DEPARTAMENTO DE NARIÑO

El aprovechamiento de las aguas subterráneas en la mayor parte del territorio colombiano es todavía muy incipiente, entre otras cosas, por desconocimiento del potencial de tales recursos, tanto a nivel regional como local. Existen en el país grandes áreas susceptibles de ser incorporadas al desarrollo del país, en las cuales hay recursos de agua subterránea que podrían utilizarse para suplir necesidades de agua para diferentes usos.

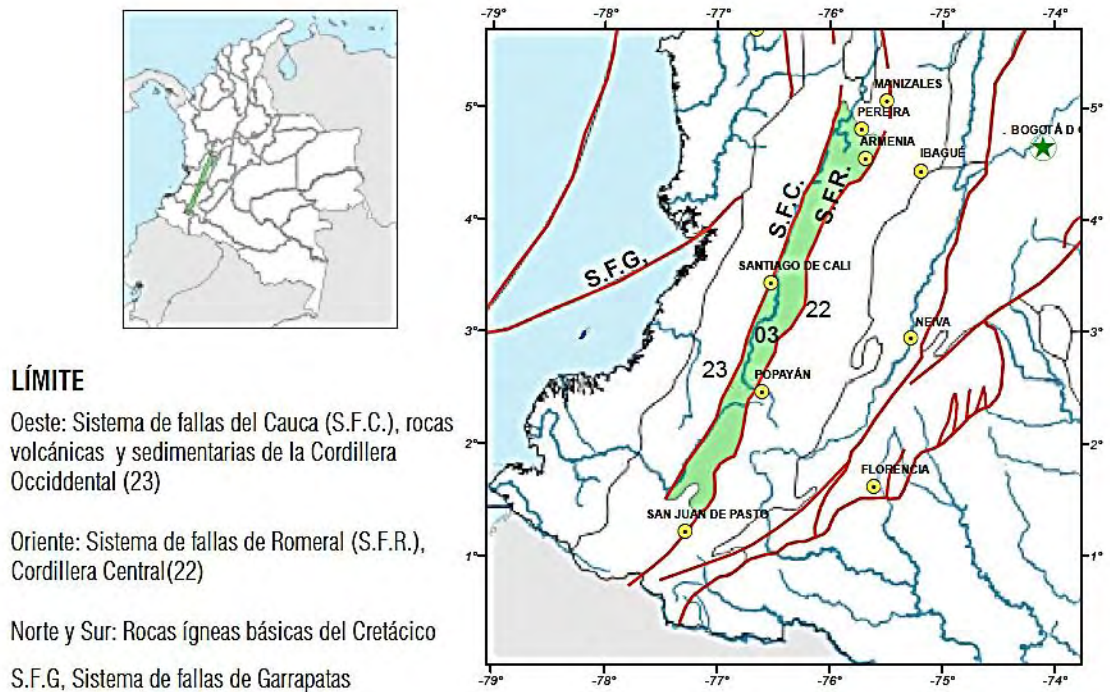
Provincias hidrogeográficas

Corresponden a unidades mayores referidas a escalas menores (entre 1:10.000.000 y 1:500.000), definidas en unidades tectonoestratigráficas separadas entre sí por rasgos estructurales regionales, que coinciden con límites de cuencas geológicas mayores y que, desde el punto de vista hidrogeológico, corresponden a barreras impermeables representadas por **fallas regionales** y **altos estructurales**. Adicionalmente, se caracterizan por su homogeneidad geomorfológica.

La provincia hidrogeológica mejor estudiada del territorio colombiano corresponde al Cauca-Patía, sobre la cual se soporta el desarrollo regional de esta parte del país.²³

Provincia hidrogeológica de Cauca-Patía. Localización geográfica y límites geológicos

Figura 2.2. Ubicación de la provincia hidrogeológica de Cauca- Patía.



En los municipios de El Bordo, Balboa y Mercaderes (Cauca), sobre la cuenca del río Patía, se explotan acuíferos del terciario y cuaternario aluvial mediante pozos de 60-70 m de profundidad, con transmisividades de 222 m²/día y caudales de 43 l/s.

Es importante anotar que en la cuenca del río Cauca, la recarga que puede superar los 4.500 millones de m³ por año es muy inferior a la extracción anual de

²³ RODRÍGUEZ César, VARGAS Nelson Omar, JARAMILLO Omar, PIÑEROS Andrea, CAÑAS Hugo, Sistema de información ambiental de Colombia, Estudio Nacional del agua, Capítulo 4, 2010, pp.112-165. [En línea]. [Citado noviembre de 2013]. Disponible en internet https://www.siac.gov.co/documentos/DOC_Portal/DOC_Agua/20120928_Ofert_uso_agua_sub_EN_A_2010.pdf

agua subterránea mediante pozos, que es del orden de 1.650 millones de metros cúbicos por año. Ello indica que (contrario a lo que ocurre en la mayoría de las provincias hidrogeológicas de Colombia), en la del Cauca-Patía la recarga es más importante que las reservas.

Uso del agua subterránea

La determinación del uso del agua subterránea para cada provincia hidrogeológica se hizo con base en la información disponible sobre caudales extraídos mediante pozos, en los estudios regionales realizados por las autoridades ambientales. Para el departamento de Nariño se tiene la siguiente información

Tabla 2.23. Uso del agua subterránea según jurisdicción de la autoridad ambiental.

Autoridad ambiental	Doméstico m ³ /año	Industrial m ³ /año	Agrícola m ³ /año	Pecuario m ³ /año	Servicios m ³ /año	Otros m ³ /año	Total m ³ /año
Corponariño	505.958	35417	47433			342152	939960

Según investigaciones realizadas, existen fuentes de agua con altos contenidos de hierro y/o manganeso destinadas al consumo humano en el departamento de Nariño a las cuales no se les realiza un tratamiento adecuado, encontrándose las siguientes:

Acueducto Chorrillo, Chaquilulo y Chitaira “CHOCHACHI”:

Cubre las veredas anteriormente citadas, las cuales son aledañas al municipio de Aldana, se utiliza el sistema de pozo profundo, aun no cuenta con sistema de tratamiento, lo que significa que el agua no es potable presentándose consecuencias como alto contenido de hierro, tiene una cobertura del 73.53%.¹⁹

En la Tabla 2.24, se indican las características del sistema de acueducto con que cuentan estas veredas:

Tabla 2.24. Sistema actual del acueducto de Chochachi.

SISTEMA DE ACUEDUCTO CHOCHACHI	
Fuente de agua	Pozo profundo en la vereda Chaquilulo
Problemas fuente de agua	Principalmente alto contenido de hierro por tratarse de fuente subterránea
Captación	Por bombeo hasta el taque de Almacenamiento
Aducción	NP
Desarenador	NP
Conducción	Tubería PVC 2 ½", L=1800m, enterrada
Tanque de almacenamiento	Tanque semienterrado en concreto, capacidad útil 87.18m ³ , buen estado
Red de distribución	Longitud aproximada de 5Km, en tubería PVC de 3", 2", 1 1/2" y ¾", acometidas en ½", no existe micro medición
Calidad	Nivel de alto riesgo debido a que los valores de color aparente, Turbiedad y coniformes totales se encuentran por encima de los valores permitidos en la Resolución 2115 del 2007

Acueducto de Guespud

Cubre a veredas como El Rosa y el sector Alto Mueas, las cuales son aledañas al municipio de Aldana, en estas veredas no existe acueducto y no se presta el servicio por parte de ningún ente. En la actualidad se abastecen de arroyos y pozos.²⁴

En la Tabla 26, se indican las características del sistema de acueducto con que cuentan estas veredas:

²⁴ Acueducto [En Línea]. [Citado noviembre de 2013]. Disponible en internet: <http://aldana-narino.gov.co/apc-aa-files/33626335366338643465663463386336/ACUEDUCTO.pdf>

Tabla 2.25. Sistema actual del acueducto de Guespud.

SISTEMA DE ACUEDUCTO GUESPUD	
Fuente de agua	Pozo profundo en la vereda
Problemas fuente de agua	Principalmente alto contenido de hierro por tratarse de fuente subterránea
Captación	Por bombeo hasta el taque de Almacenamiento en Guespud
Aducción	NP
Desarenador	NP
Conducción	Tubería PVC 3", L=500m
Tanque de almacenamiento	Tanque semienterrado en concreto, capacidad útil 29.43 m3, buen estado
Red de distribución	Longitud aproximada de 2 Km., en tubería PVC de 2", 1", acometidas en ½", no existe micro medición
Calidad	Nivel de alto riesgo debido a los altos contenidos de hierro, no existe tratamiento alguno

Municipio de Cuaspud, Carlosama

En las veredas del Municipio de Cuaspud, Carlosama existe un gran porcentaje de utilización del agua subterránea, la gente se abastece de esta agua por medio de pozos, aunque no se han realizado ensayos de laboratorios sobre la calidad del agua.²⁵

Las aguas subterráneas localizadas en el territorio como Macas Centro y el Pozo Ipiazán, localizado en el sector el Pirio (Denominado "El Pulmón), se constituyen como cuerpos de agua que emergen del subsuelo. De estos se hace uso para consumo doméstico y labores agropecuarias.²⁰ La información detallada se indica en la Tabla 2.26.

²⁵ Plan de uso eficiente y ahorro del agua [En Línea]. [Citado noviembre de 2013]. Disponible en internet, Alcaldía Cuaspud Carlosama, pp.35-36.

Tabla 2.26. Utilización de agua subterránea en el sector rural

Veredas	No. Viviendas	Agua subterránea (viviendas)	%	Agua lluvia	%	Otros	%
Macas	507	373	73.57	47	9.27	87	17.1
Carchi	310	125	40.32	20	6.45	165	32.5
Chavisnan	207	109	52.66	8	3.86	90	17.8
San Francisco	173	93	53.76	1	0.58	79	15.6

Tabla 2.27. Utilización de agua subterránea en el sector urbano

Veredas	No. Viviendas	Agua subterránea (viviendas)	%	Agua lluvia	%	Otros	%
Zona urbana	415	18	4.34	15	3.61	382	92

Del diagnóstico realizado existen veredas y municipios de Nariño en los cuales se utilizan fuentes de agua subterránea, las cuales no están ampliamente aprovechadas; además, uno de los principales problemas que presentan estas fuentes de agua empleadas para el consumo humano, es el alto contenido de hierro, por lo tanto, el sistema de aireación por bandejas puede ser una opción para disminuir los niveles de este metal en el agua. Sin embargo, se debe analizar la posibilidad de realizar algunos ajustes o cambios en el diseño del sistema para incrementar la eficiencia de remoción. Los aireadores de bandejas tienen la ventaja de ser sistemas económicos dado que no necesitan de costosos materiales para su construcción ni para sus lechos, además es un sistema que no consume energía eléctrica, por lo cual, puede ser empleado en zonas rurales con baja capacidad económica.

3. CONCLUSIONES

Realizando una evaluación general de los lechos probados en cuanto a remoción de hierro y manganeso, los porcentajes de remoción promedio logrados para el metal hierro fueron para el lecho de grava 26,01%, coque 23,62% y coque y grava fue de 25,36%. Para el caso del metal manganeso, los porcentajes de remoción promedio logrados fueron para el lecho de grava 20,71%, coque 20,81% y coque y grava 24,95%. De esto se puede concluir que el lecho que alcanzó mayor porcentaje de remoción de hierro fue la grava, y el lecho más eficiente en cuanto a remoción de manganeso fue el de coque y grava. Sin embargo las diferencias entre las eficiencias alcanzadas con los diferentes lechos tanto para hierro como para manganeso no son estadísticamente significativas, por lo cual la utilización de cualquiera de estos lechos bajo las condiciones de diseño de esta investigación, traería prácticamente los mismos resultados.

De acuerdo con los resultados de los análisis de hierro y manganeso realizados a las muestras de agua a la entrada y a la salida del aireador de bandejas se puede concluir que los niveles de hierro y manganeso no descendieron a los niveles máximos exigidos por el Decreto 1575 de 2007 y la Resolución 2115 del 22 de junio de 2007, en el cual el nivel máximo permitido de hierro es 0,3 mg/l y para manganeso es 0,1 mg/l para agua destinada para consumo humano.

El pH del agua a la salida del aireador siempre se incrementó; para el lecho de grava en promedio pasó de 8,10 a 8,29, para el lecho de coque pasó de 8,12 a 8,47 y para el lecho de coque y grava de 8,28 a 8,51, lo cual favoreció el proceso de remoción de hierro y manganeso puesto que el pH óptimo para remoción de hierro está entre 7,5 y 8,5 y para manganeso valores superiores a 9,5.

El sistema de aireación de bandejas con los lechos probados no sirve para remoción de color, puesto que este se incrementó a la salida del aireador de bandejas en lugar de removerse, donde para el lecho de grava se incrementó en 2,46%, para el lecho de coque en 20,65% y para el lecho de coque y grava en 3,20%.

El aireador de bandejas probado con los lechos de grava, coque y la combinación de coque y grava no incrementan considerablemente el nivel de oxígeno disuelto en el agua, siendo los porcentajes de introducción de oxígeno disuelto en el agua de 13,64%, 9,84% y 10,61% respectivamente y por consecuencia no se logran resultados de remoción de hierro y manganeso elevados.

El sistema probado sirve para ser usado en fuentes de agua no requieran un alto grado de remoción de hierro y manganeso, ya que las máximas eficiencias de

remoción alcanzadas fueron de 26,01% para hierro y 24,95% para manganeso, de modo que con estos porcentajes de remoción debe proyectarse alcanzar los valores máximos exigidos por la normatividad.

4. RECOMENDACIONES

Realizar una nueva investigación en la cual se realicen ajustes o cambios al diseño del sistema planteado inicialmente en el trabajo de grado como por ejemplo usar un mayor número de bandejas, mayor espaciamiento entre estas y por lo tanto mayor altura del dispositivo con el fin de que el tiempo de aireación incremente asimismo, puede disminuirse la carga hidráulica para que el agua tenga un mayor tiempo de contacto con los lechos utilizados; también sería adecuado investigar la posibilidad de usar materiales de lecho con un tamaño nominal menor de tal manera que se incremente el área específica de contacto y finalmente determinar si la eficiencia de remoción de hierro y manganeso aumenta significativamente y permite obtener niveles de estos metales debajo de lo permitido por el Decreto 1575 de 2007 y la Resolución 2115 del 22 de junio de 2007.

Plantear una metodología utilizando un modelo estadístico adecuado que permita realizar una investigación en donde la eficiencia de remoción de hierro y manganeso se evalúe a través del tiempo pero con intervalos de tiempo más largos, los cuales permitan determinar si la eficiencia está en función del tiempo y determinar si esta se estabiliza, cuando lo hace y cuanto fue la eficiencia de remoción de estos metales.

Utilizar una capa delgada de grava sobre el coque, esto garantiza un mejor funcionamiento hidráulico y una mejor aireación.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Acueducto [Documento electrónico, Online]. [Citado noviembre de 2013]. Disponible en internet

NARVÁEZ HERNANDEZ, Mauricio Biron, Diseño de un sistema potabilización a partir de un agua subterráneas, para la planta de los Álamos de la ciudad de Francisco de Orellana, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, pp. 75. [Documento electrónico, Online]. [Citado marzo de 2013].

Plan de uso eficiente y ahorro del agua [Documento electrónico, Online]. [Citado noviembre de 2013]. Disponible en internet, Alcaldía Cuaspud Carlosama,

RAS 2000 Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico, Título C, Colombia, 2000, pp.29, 32. [En línea]. [Citado junio de 2013].

Resolución 2115 de 22 de junio de 2007, Colombia, 2007. [En línea]. [Citado junio de 2013].

RODRÍGUEZ, César; VARGAS, Nelson Omar; JARAMILLO, Omar; PIÑEROS, Andrea; CAÑAS, Hugo, Sistema de información ambiental de Colombia, Estudio Nacional del agua, Capítulo 4, 2010, pp.112-165. [Documento electrónico, Online]. [Citado noviembre de 2013].

ROMERO ROJAS, Jairo Alberto, Calidad del agua, 2 edición, Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, Colombia, julio de 2005, pp. 165.

ROMERO ROJAS, JAIRO ALBERTO, Purificación del agua, Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, Colombia, 2005, pp. 22

SALAZAR, Helem; Ordoñez July, Evaluación de lechos de contacto en aireadores de bandeja en la empresa de concentrados de Solla en el Municipio de Pasto, Universidad Mariana, Colombia, 2010, pp. 50-93.

SALKIND, NEIL J., Métodos de investigación, México D.F, 1999, pp. 168, 171. [En línea]. [Citado marzo de 2013].

Salud ambiental y el riesgo volcánico, Capítulo 3: Contaminación atmosférica por emisiones volcánicas, pp. 55-64 (marzo 2013). [Documento electrónico, Online], [citado marzo de 2013].

Significancia estadística [Documento electrónico, Online]. [Citado noviembre de 2013].

Tubo de Mariotte [Documento electrónico, Online]. [Citado junio de 2013].

VERA BRITO, Nancy, Instituto Politécnico Internacional, México D.F, Alternativas de potabilización para el agua que abastecerá a la ampliación del aeropuerto internacional de la ciudad de México, pp. 23. [Documento electrónico, Online]. [Citado marzo de 2013].

VERA SORIANO, Roberto, Temas de construcción, 2 Edición, Editorial Club Universitario, 2001 pp. 52-55. [Documento electrónico, Online]. [Citado junio de 2013].