

**EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE AIREACION PARA TRANSFERENCIA DE OXÍGENO EN
AGUAS SUBTERRANEAS**

JUAN DAVID HERNÁNDEZ OSPINA - 201036043



**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA ACADEMICO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL
SANTIAGO DE CALI
2019**

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE AIREACION PARA TRANSFERENCIA DE OXÍGENO EN AGUAS SUBTERRANEAS

Presentado por:
JUAN DAVID HERNÁNDEZ OSPINA – 201036043

Trabajo de grado presentado como requisito
para optar por el título de Ingeniero Sanitario
y Ambiental.

Director:
Ing. Msc. PhD. LUIS DARÍO SÁNCHEZ TORRES
Profesor Instituto CINARA



UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL
SANTIAGO DE CALI
2019

AGRADECIMIENTOS

A mi madre Dignora por haber sido una gran fortaleza y apoyo en el desarrollo de mi carrera profesional y de esta investigación.

Al profesor Luis Darío Sánchez, por su valiosa guía, conocimientos compartidos y por aportarme los elementos necesarios para el desarrollo y culminación del trabajo de grado.

A la Ing. Luz Helena Mora, Jefe de Operaciones de la PTAR Cañaveralejo, por su valiosa ayuda y brindarme el espacio necesario para el desarrollo de la etapa experimental del proyecto dentro de las instalaciones de la PTAR-C.

GLOSARIO

Absorción: proceso de transferencia de sustancias volátiles del aire al agua.

Aireación: proceso de adición o absorción de gases del aire hacia el agua poniéndolos en contacto.

Acuífero: formación geológica permeable que permite la circulación y el almacenamiento del agua subterránea a través de sus grietas o poros.

Concentración de saturación de OD: Máxima cantidad de oxígeno disuelto en agua para una temperatura y presión atmosférica dada

Constante global de transferencia de gas K_{La} : mide la velocidad a la cual las moléculas del gas se mueven a través de la capa límite interfacial del fluido, depende de la geometría del sistema, de la temperatura, viscosidad, naturaleza del fluido y la difusividad.

Desorción: proceso de transferencia de sustancias volátiles del agua al aire.

Presión parcial: la presión parcial de un gas ideal en una mezcla es igual a la presión que ejercería el solo ocupando el mismo volumen a la misma temperatura.

Solubilidad: máxima cantidad de soluto que se disuelve en una cantidad de agua a una temperatura específica.

Transferencia de gas: fenómeno físico donde las moléculas de gas se intercambian en una interfaz gas-líquido provocando un aumento de la concentración del gas en el líquido

ABREVIATURAS

AS: Agua subterránea

Cs: concentración de saturación

H: Altura

K_{La} : coeficiente global de transferencia de oxígeno

O_2 : Oxígeno

OD: oxígeno disuelto

P_A : presión parcial de compuesto A

P_v : presión de vapor

Q : caudal

T° : temperatura

RESUMEN

El presente trabajo de grado se realizó para estudiar el comportamiento de dos tipos de aireadores para aguas subterráneas a escala piloto en relación con la transferencia de oxígeno. El estudio piloto se hizo para un aireador de aspiración hidráulica tipo Venturi y un aireador a gravedad tipo Cascadas tomando agua de un pozo profundo localizado en la PTAR Cañaveralejo de Cali.

Las mediciones de cada ensayo se realizaron para el caudal de diseño (0,8 L/s) y para los caudales de 0,6 y 1,0 L/s en diferentes intervalos de tiempo, evaluando la influencia de la temperatura, el pH del agua y dos tipos de aireadores frente a la concentración de oxígeno disuelto.

Los resultados permitieron evidenciar una mayor transferencia de oxígeno para el aireador de Cascadas que para el aireador tipo Venturi. Con una concentración de OD del agua cruda promedio de 0,66 mg/L y un caudal de diseño de 0,8 L/s el aireador de Cascadas alcanzó una concentración de OD de 5,5 mg/L logrando superar el valor de referencia recomendado de 4 mg/L, mientras que el aireador Venturi obtuvo una concentración de 2,75 mg/L.

El coeficiente de eficiencia obtenido para el aireador de cascadas fue de 0,728 (72,8%), valor superior al coeficiente de eficiencia teórico (0,472) y para el aireador Venturi fue de 0,314 (31,4%), valor inferior al teórico (0,475). Lo que demostró que el aireador de cascadas superó las expectativas en términos de transferencia de oxígeno al agua subterránea.

En el aireador de Cascada el parámetro altura entre escalones tuvo influencia en la transferencia de oxígeno, ya que aumentó la velocidad de caída entre bandejas e influyó en la absorción de oxígeno al tener el agua contacto con el aire y cuando el aire pasaba a través de la superficie del agua en la bandeja, esto debido a la inmersión del flujo de caída en la masa de agua de la bandeja receptora, causando la entrada de mayor cantidad de aire. Por lo tanto, la velocidad de caída determinó la transferencia del oxígeno en este mecanismo de transferencia.

Este trabajo de grado contribuyó a entender la transferencia de oxígeno en agua subterránea empleando sistemas de aireación.

Palabras clave:

Oxígeno disuelto, agua subterránea, aireador Venturi, aireador de Cascadas, transferencia de oxígeno, ley de Henry

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	1
1. DRESCIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	2
2. JUSTIFICACIÓN.....	3
3. ANTECEDENTES.....	4
4. OBJETIVOS.....	5
4.1. Objetivo General.....	5
4.2. Objetivos Específicos.....	5
5. MARCO TEÓRICO.....	6
5.1. Transferencia de masa.....	6
5.2. Presión de vapor.....	6
5.3. Ley de Henry y la Concentración de saturación o de equilibrio.....	6
5.4. Tasa de transferencia de oxígeno.....	7
5.5. Sistemas de aireación.....	8
5.5.1. Aireadores de Cascadas o escalonado.....	9
5.5.2. Aspirador hidráulico tipo Venturi.....	9
6. METODOLOGIA.....	11
6.1. Esquemas de aireadores de aguas subterráneas de pozo profundo.....	12
6.2. Comportamiento de aireadores en términos de eficiencia de transferencia de oxígeno....	19
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	20
7.1. Esquemas del aireador tipo Venturi y el aireador de Cascadas.....	21
Concentración de Saturación de Oxígeno (Cs).....	21
7.1.1. Aireador tipo Venturi.....	21
7.1.2. Aireador de Cascadas.....	23
7.2. Comportamiento de aireadores en términos de transferencia de oxígeno.....	24
7.2.1. Análisis de datos.....	24
Análisis de la Varianza.....	30
7.3. Efecto de los parámetros de diseño sobre la transferencia de oxígeno.....	34
Aireador de Cascadas.....	34
Aireador Venturi.....	35
8. CONCLUSIONES.....	36
9. RECOMENDACIONES.....	37
BIBLIOGRAFÍA.....	38
ANEXOS.....	42

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Aplicaciones de la transferencia de gases en el tratamiento de agua.....	4
Tabla 2. Estudios realizados con sistemas de aireación en aguas subterráneas	4
Tabla 3. Factores que influyen en la constante de Henry y la solubilidad de los gases	7
Tabla 4. Otros sistemas de aireación.....	10
Tabla 5. Parámetros del pozo de agua subterránea.	13
Tabla 6. Métodos para medición de parámetros.....	17
Tabla 7. Análisis de la varianza	20
Tabla 8. Cálculos de velocidad y pérdidas de energía primarias	21
Tabla 9. Valores de K y pérdidas locales o por accesorios del aireador Venturi.....	21
Tabla 10. Pérdida de energía total y presiones en el punto de aspiración P_2	22
Tabla 11. Dimensiones de bandejas del aireador de cascada.....	23
Tabla 12. Altura, velocidad y tiempos de caída de aireador cascadas	24
Tabla 13. Estadísticas descriptivas para el agua cruda y efluente de los aireadores y el blanco	24
Tabla 14. Análisis de Varianza para caudal de 0,8 L/s	31
Tabla 15. Resumen del ANOVA para caudal de 0,8 L/s	31
Tabla 16. Análisis de Varianza para caudal de 0,6 L/s	32
Tabla 17. Resumen del ajuste del ANOVA para caudal de 0,6 L/s.....	33
Tabla 18. Análisis de Varianza para caudal de 1,0 L/s	33
Tabla 19. Resumen del ajuste de la ANOVA para caudal de 1,0 L/s	34

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Transferencia del gas al líquido. Fuente Weber (1972)	6
Figura 2. Progreso de la concentración de OD durante la aireación.....	8
Figura 3. Aireador en cascada o escalonado. Fuente: (Pöpel, 1995)	9
Figura 4. Aspirador tipo Venturi. Fuente: (Pöpel, 1995).....	10
Figura 5. Diagrama del procedimiento experimental.....	11
Figura 6. Localización pozo de agua subterránea de la PTAR-C. Fuente: Google Maps	12
Figura 7. Esquema del aireador Venturi	13
Figura 8. Presión de entrada al aireador Venturi	14
Figura 9. Aireador de Cascadas	15
Figura 10. Toma de datos de OD, pH y Temperatura inicial con equipo de medición	18
Figura 11. Diagrama del proceso de los aireadores	18
Figura 12. Instalación de manguera de aspiración	22
Figura 13. Instalación aireador Venturi	22
Figura 14. Construcción Aireador de cascadas	23
Figura 15. Curva de OD para caudal 0,8 L/s.....	26
Figura 16. Curva de pH y temperatura para caudal 0,8 L/s	26
Figura 17. Curva de OD para caudal 0,6 L/s.....	27
Figura 18. pH y temperatura para caudal 0,6 L/s.....	27
Figura 19. Curva de OD para caudal 1,0 L/s.....	28
Figura 20. pH y temperatura para caudal 1,0 L/s.....	28
Figura 21. Diagrama de cajas del OD en aireador de Cascadas y Venturi	29
Figura 22. Diagrama de cajas para el pH en aireador de Cascadas y Venturi.....	29
Figura 23. Gráfica de dispersión para temperatura y OD en aireador Venturi	30
Figura 24. Grafica de dispersión y matriz de correlación para T° y OD en aireador Cascadas	30
Figura 25. Grafica de efectos principales para Anova del caudal de 0,8 L/s.....	32
Figura 26. Grafica de efectos principales para Anova del caudal de 0,6 L/s.....	33
Figura 27. Grafica de efectos principales para Anova del caudal de 1,0 L/s.....	34

INTRODUCCIÓN

El agua subterránea hace parte del ciclo hidrológico, siendo el resultado de la infiltración del agua que proviene de la precipitación o de fuentes superficiales interconectadas a través de poros o grietas de sedimentos y rocas (MADS, 2014b). En Colombia, constituyen un recurso importante pues son reconocidas por ser fuentes principales o alternas de abastecimiento en poblaciones con acceso a aguas superficiales limitadas en cantidad o con calidad deficiente para su consumo. Según el MADS, (2014a), aproximadamente 106 municipios del país dependen parcial o exclusivamente de este recurso para su abastecimiento. En el Valle del Cauca cerca del 20% del abastecimiento de agua rural emplea agua subterránea (Marín, 2015), atendiendo aproximadamente un millón de habitantes, donde además, gran parte es usada en el riego de cultivos (CVC, 2009).

Las características de las aguas subterráneas dependen de la naturaleza geológica del suelo, debido al constante movimiento donde se estancan y recirculan desarrollando un equilibrio entre la composición del suelo y el agua. Suelen tener mejor calidad que el agua superficial respecto a la turbiedad, los microorganismos patógenos y la materia orgánica total (AWWA, 2010). Su temperatura es más constante, y contiene mayor presencia de hierro y manganeso en estado reducido (Fe^{+2} y Mn^{+2}) (Bracho, Chacón, Hernandez, Vargas, & Santiago, 2013), dióxido de carbono (CO_2), fosfatos, ácido sulfhídrico (H_2S), metano (CH_4), compuestos orgánicos volátiles (COVs), nitratos, dureza, poca turbiedad, bajo contenido microbiológico y un bajo o nulo contenido de oxígeno disuelto (OD) (AWWA, 2002; García, 2008). Según el DAGMA, el agua subterránea de Santiago de Cali contiene dureza y presencia de Fe y Mn, la cual requiere de tratamiento para ser usada en abastecimiento para consumo humano (Contraloría General de Santiago de Cali, 2016).

Debido a la baja solubilidad del oxígeno en el agua, su transferencia natural en los sistemas de tratamiento de agua que se abastecen de una fuente subterránea no es suficiente, por lo cual, es necesario acelerar la transferencia para tener una tasa más elevada y eficiente y lograr la concentración de OD deseada (Torrez & Rodriguez, 2014). Este incremento del OD se produce mediante el proceso de aireación, proceso unitario que usa los principios de la transferencia de masa para cambiar el contenido de los gases disueltos en el agua. Un mayor contacto del agua con el aire permite que la desorción o absorción se acelere por encima de la velocidad que se produce naturalmente (Crittenden, Truseell, Hand, Howe, & Tchobanoglous, 2012; de Moel, Verberk, & Van Dijk, 2006).

El contacto aire-agua puede lograrse por varios sistemas, entre los más comunes se encuentran: aireación por caída del agua a través del aire formando capas o películas delgadas de agua (aireadores de torres o bandejas, cascadas) o por difusión de pequeñas burbujas de aire a través del agua (de Moel et al., 2006).

La transferencia del oxígeno en el agua depende de varios factores: el coeficiente de solubilidad, la concentración en el aire (relacionado a su presión parcial), la temperatura del agua y las impurezas presentes (Chang, 2007; R. Marín, 2003; Pöpel, 1995). Si el agua contiene NH_3 , Fe^{+2} o Mn^{+2} es preferible que la concentración de OD se acerque a la concentración de saturación (de Vargas, 2004).

Al transferir oxígeno al agua subterránea mediante la aireación, se produce principalmente la oxidación del Fe^{+2} y Mn^{+2} en compuestos insolubles que se precipitan en forma de hidróxido férrico $\text{Fe}(\text{OH})_3$ y

dióxido de manganeso MnO_2 , siendo una de las principales utilidades de la transferencia de oxígeno a las aguas subterráneas. Además, se disminuye la concentración de CO_2 y H_2S , se mejora el olor y sabor y se remueven COVs, CH_4 y NH_3 (MVCT, 2017; Romero, 2006).

La aireación es una de las operaciones de mayor consumo de energía en los procesos de tratamiento de agua cuando se usan equipos de difusión o equipos mecánicos (Romero, 2006), lo que los hace poco viables para su uso en zonas de escasos recursos económicos. En el presente trabajo se pondrá en estudio dos esquemas de sistemas de aireación de aguas subterráneas a escala piloto para evaluar su comportamiento en términos de transferencia de oxígeno. Se pretende de esta manera mejorar las condiciones de calidad del agua subterránea en términos de oxígeno disuelto para su uso y aprovechamiento.

1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Las aguas subterráneas pueden presentar características no deseadas para el consumo humano como, olor, sabor, color, dureza, Fe, Mn, gases como CO_2 , H_2S , SO_2 y baja concentración de OD (AWWA, 2002). Uno de los inconvenientes del agua subterránea de pozo profundo es la poca o nula presencia de OD al no tener contacto con la atmósfera, bajo estas condiciones, el OD se presenta frecuentemente por debajo de 2 mg/L (DAGMA, 2015).

Según el MVCT (2010), el OD en el agua cruda debe ser mayor o igual a 4 mg/L en fuentes superficiales a ser tratada para consumo humano. El oxígeno es un gas poco soluble en agua con un alto valor de constante de Henry, por lo que su transferencia hacia el agua de forma natural es baja (Montgomery, 1985). Dependiendo del método de transferencia de oxígeno, el aireador, puede ser de alto consumo de energía y por lo tanto de alto costo operacional, o puede no ser eficiente, por lo que requiere un mayor tamaño para cumplir con el objetivo de transferencia (Crittenden et al., 2012). Esto hace conveniente ahondar en propuestas de mejoramiento de los sistemas de aireación para lograr una mayor transferencia de oxígeno a costos razonables de operación y de consumo energético, especialmente para su implementación en zonas de bajos recursos económicos. El aumento de la concentración de OD reduce la aplicación de oxidantes químicos para estos iones, que pueden aumentar los gastos de operación en los sistemas de potabilización (Loaiza, 2009).

La baja concentración de OD en las aguas subterráneas, hace que se presente un medio reductor con un pH bajo, lo que propicia la existencia de ion ferroso Fe^{2+} e ion manganeso Mn^{2+} en estado disuelto, impidiendo su oxidación y precipitación (Romero, 2009).

La presencia de hierro produce rechazo del agua por parte de los usuarios ya que afecta el sabor, produce manchas sobre los artefactos sanitarios y la ropa blanca y es una fuente de alimento para el crecimiento bacteriano (AWWA, 2010; CEPIS, 2005); además, produce alteraciones en la turbiedad en forma de Fe^{3+} y el color del agua. Altas concentraciones de manganeso en el organismo pueden causar daños en el sistema nervioso central y en concentraciones mayores a 0,15 mg/L, puede impartir un mal sabor al agua. Al oxidarse estos compuestos, provocan el desarrollo de ciertas bacterias que forman depósitos insolubles en las redes de distribución y los tanques de almacenamiento (de Vargas, 2004), por lo que su oxidación y remoción debe efectuarse en las plantas de tratamiento, previo a la llegada a las redes de distribución y tanques.

Por consideraciones de sabor y olor, las guías de calidad de la OMS y la normatividad nacional - resolución 2115 del 2007- recomiendan que en las aguas destinadas al consumo humano no se sobrepase 0,3 mg/L de hierro y 0,1 mg/L de manganeso (MPS & MVDT, 2007). Por lo general, en el agua es más difícil de controlar o remover el manganeso que el hierro (CEPIS, 2005).

2. JUSTIFICACIÓN

El OD es un parámetro de monitoreo y seguimiento importante en el agua cruda usada en tratamiento para consumo humano. El MVCT, (2010) indica que concentraciones mayores a 4 mg/L en la fuente de abastecimiento corresponde a calidad del agua aceptable, y por el contrario concentraciones menores a 4 mg/L son deficientes como fuente de agua cruda, en especial en fuentes superficiales. Al presentarse variaciones en la concentración de OD del agua, se refleja síntomas de un probable aumento de algas, materia orgánica, bacterias aerobias, reductores inorgánicos, entre otros que puedan afectar su calidad.

La aireación se recomienda para aguas subterráneas debido a su baja concentración de oxígeno, porque el agua extraída proviene de extractos anóxicos. La aireación contribuye a la oxidación del Fe^{2+} y Mn^{2+} y ayuda a disminuir la demanda de cloro u otros oxidantes químicos usados para su oxidación (CEPIS, 2005). Al promover su oxidación en las plantas de tratamiento, evita que se depositen los precipitados de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ y películas bacterianas en los tanques de almacenamiento y en las redes de suministro mejorando su capacidad de conducción (AWWA, 2010; de Vargas, 2004). La infraestructura de las redes normalmente son los componentes más costosos en sistemas de abastecimiento y distribución de agua, por lo tanto una remoción previa de estos componentes oxidados prolonga su vida útil.

El incremento del OD mejora el sabor y olor del agua mejorando su palatabilidad; remueve cierto porcentaje de materia orgánica (Calderón, Forero, & Suarez, 2012); remueve gases disueltos como CO_2 y H_2S lo que provoca un aumento del pH disminuyendo los problemas de corrosión en las tuberías e incrementa la velocidad de oxidación de Fe^{+2} y Mn^{+2} , además, el OD es conveniente para evitar fenómenos de anaerobiosis en las redes de distribución (R. Marín, 2003). La literatura reporta que la concentración de OD se mantenga entre 2 y 4 mg/L en el agua potable (AWWA, 2010).

La selección de un tipo de aireador debe ser determinada por la calidad deseada del agua a ser aireada a través de pruebas de ensayos controlando el tiempo de contacto, caudal de operación, cargas superficiales, presiones, difusividad, entre otros parámetros de acuerdo con el tipo de aireador y evaluando la concentración de oxígeno a diferentes temperaturas (MVCT, 2010), además de estos parámetros, también debe ser tenido en cuenta los costos de inversión y de operación.

Según AWWA (2010), la eficiencia de transferencia de oxígeno en el proceso de aireación se controla por el contacto superficial que se puede lograr entre el aire y el agua, el contacto es controlado por el tamaño de las gotas de agua o las burbujas de aire que proveen el área de contacto, entre mayor sea el área de contacto, mayor será la eficiencia de transferencia de oxígeno.

Teniendo en cuenta la importancia del OD en el agua para mejorar las propiedades organolépticas, el presente trabajo de grado contribuirá a entender la transferencia de oxígeno en los sistemas de aireación de aguas subterráneas usadas para consumo humano en ambiente tropical, evaluando dos prototipos de aireadores para aguas de pozo profundo con el fin de comparar su eficiencia.

3. ANTECEDENTES

La aireación tiene una larga tradición en el tratamiento del agua en aplicaciones como la adición de gases al agua o la remoción de gases disueltos dependiendo del objetivo del tratamiento (Kavanaugh & Truseell, 1980). Para las aguas subterráneas, un propósito es incrementar la concentración de OD, desorber CO₂, disminuir la corrosividad al aumentar el pH y oxidar minerales como Fe y Mn con el fin de precipitarlos y removerlos (Loaiza, 2009; Romero, 2006). En la Tabla 1 se presentan aplicaciones de la absorción y desorción de gases en las aguas subterráneas.

Tabla 1. Aplicaciones de la transferencia de gases en el tratamiento de agua

Absorción		Desorción	
O ₂	Oxidación de Fe ²⁺ , Mn ²⁺ S ²⁻ , mejora olor y sabor	CO ₂	Control de corrosión
O ₃	Desinfección, remoción de color, oxidación de compuestos orgánicos	O ₂	Control de corrosión
Cl ₂	Desinfección, Oxidación de Fe ²⁺ , Mn ²⁺ , H ₂ S	H ₂ S	Control de olor
ClO ₂	Desinfección	NH ₃	Remoción de nutrientes
CO ₂	Control de pH	COVs	Control de olor y sabor, remoción de cancerígenos potenciales
SO ₂	Declorinación		

Adaptado de (Crittenden et al., 2012)

En la Tabla 2 se presentan algunas investigaciones e implementaciones aplicadas con sistemas de aireación para mejorar la transferencia de oxígeno como alternativa de oxidación de Fe y Mn y de remover el CO₂.

Tabla 2. Estudios realizados con sistemas de aireación en aguas subterráneas

Autor	Lugar	Agua	Tecnología	Ensayo	Resultados
(Saldarriaga, Navarrete, & Galeano, n.d.)	Lab de Hidráulica Universidad de los Andes - Bogotá DC	Agua potable	Aireador de flujo de alta velocidad: tanque 6,5 m ³ con dissipador de energía, aireador con entrada lateral al canal por debajo de la napa de agua y sistema escalón/rampa	3000 pruebas con Ø ducto aireador de ½" a 3". Caudales entre 20-140 L/s. Se midió la subpresión bajo napa, la longitud del salto y el Q _{aire}	Tres ecuaciones de diseño: para el sistema de oferta y demanda de aire y de la longitud del salto. Hubo relación entre el Q _{aire} suministrado y el área del ducto.
(García, 2008)	PTAP de El Hormiguero (Cali)	Agua de pozo profundo	2 columnas de Bandejas y torre compacta (Tanque contacto → Filtro grueso de grava → Filtro rápido de arena) a escala piloto	Comparó 2 sistemas de aireación: Torres: 4 ensayos con Q y velocidades diferentes y los otros con igual tasa. Bandejas: ensayos con Q: 22,1L/s	% Incremento OD: Torres compactas: 117,2% a 3 m/h y Q: 0,14 L/s, 139,9% a 6 m/h y Q: 0,28L/s y 128,9% 12 m/h y Q: 0,55L/s. Bandejas: 45.6% en columna 1 y 49.5% en la columna 2.

(Loaiza, 2009)	PTAP de El Hormiguero -Cali	Agua de pozo profundo	Torre compacta → Tanque de contacto → Clarificador de grava → Filtro rápido de arena a escala piloto	Ensayos con Q: 0,14, 0,28 y 0,55 L/s a 3, 6 y 12 m/h respectivamente. Se midió OD en entrada y salida de torre de aireación.	Incremento OD de 289% a Q: 0,28L/s y Vel: 6m/h y 106% a 0,55L/s y 12m/h. Remoción de 98,3% de Fe total, 100% Fe disuelto y 88,2% de Mn a 12 m/h
(Calderón et al., 2012)	Universidad EAN - Bogotá	Agua potable/ARD	Prototipo de bandejas de aireación con material cerámico (4 bandejas)	Ensayos con Q: 2,5 3,5 4,5 L/s. Medición de OD en afluente y efluente de aireador	Parámetros de diseño: Bandejas de 0,6x 0,6 m, separación: 0,7m. Esferas cerámicas Ø: 5-15cm y espesor del medio de 15, 23 y 30cm.
(Ruiz, 2013)	San Isidro, Guano, Chimborazo - Ecuador	AS	4 torres de 3 bandejas → filtro de zeolita → desinfección (cloro)	Diseño de PTAP para 10.735 habitantes Q _{diseño} : 20,34L/s	CH: 21,6 m ³ /m ² d. Altura torre: 2m. Separación entre bandejas: 0,4m. Área: 1,05m ² . Eficiencia de transferencia de OD entre 70 y 80%
(Chavarro, 2014)	Bogotá, Colombia	AS	Torre de 3 bandejas → C. parshall → floculador de flujo cruzado → sedimentador alta tasa → filtros	Diseño de PTAP para 750 habitantes Q _{diseño} : 2 L/s	CH: 200m ³ /m ² d. Altura torre: 2 m. Bandejas: 1,02x 1,02 m separación: 0,3m altura: 30 cm. Orificios: 17x17 Ø: 9,5 mm. Coque: Ø 5cm espesor 20 cm
(Oh, Yu, & Cheong, 2014)	Sabuk, South Korea	AR de mina	Aireador de Cascadas: 3 diferentes aireadores con diferentes caídas, etapas y alturas de vertederos Aireador por difusión: aire inyectado por piedras porosas	Aireador de Cascadas: Uso diferentes alturas de caídas (70 y 35 cm juntas) y profundidades de inmersión (4 y 30 cm), de 3 o 4 etapas. Aireador por difusión: 200 mL air/(L*min) en 4L de drenaje de mina. Se aireó por 60min	Aireador de Cascadas: Logró una concentración de OD de 5 mg/L. Aireador por difusión: logró una concentración de OD de 5 mg/L y de 10mg/L al 95% de su concentración de saturación.
(Maldonado, 2015)	El Recuerdo, El Oro – Ecuador	AS	Torre de bandejas de aireación (4 bandejas) → filtro lento de arena → desinfección	Diseño una PTAP con un Q: 1,1 L/s con torre de 4 bandejas	CH: 46,8 m ³ /m ² h. Área: 0,8x 0,8 m separación: 0,45m. Orificios 26x26. Tamaño coque: 5-15cm, espesor lecho: 15-30cm. Eficiencia de transferencia de OD entre 50 y 60%

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo General

Comprender la transferencia de oxígeno en aguas subterráneas mediante sistemas de aireación a pequeña escala.

4.2. Objetivos Específicos

- Proponer dos esquemas de aireadores de aguas subterráneas de pozo profundo.
- Analizar el comportamiento de los esquemas de aireadores en términos de la eficiencia en la transferencia de oxígeno a la masa de agua.
- Revisar cuales parámetros de diseño tienen mayor efecto en la transferencia de oxígeno.

5. MARCO TEÓRICO

5.1. Transferencia de masa

La transferencia de masa ocurre cuando se dan cambios en la concentración o en el estado de una sustancia que se remueve o adiciona al agua (de Vargas, 2004). En la aireación, hay un intercambio continuo de moléculas del aire al agua y viceversa, la absorción de O_2 se produce en cuatro etapas: 1) el gas pasa de la fase gas a la interface gas-líquido; 2) el gas pasa a través de una película de gas de la interface; 3) pasa a través de una película líquida; 4) se dispersa en todo el líquido (Figura 1). La solubilidad del gas condiciona cuál de las dos películas limitan la transferencia a través de la interface. En el oxígeno, de baja solubilidad, la etapa tres es la que requiere mayor tiempo y limita la tasa de transferencia del gas. (Weber, 1972).



Figura 1. Transferencia del gas al líquido. Fuente Weber (1972)

5.2. Presión de vapor

En un sistema cerrado con agua y un espacio de aire, algunas moléculas de agua tendrán energía para superar las fuerzas atractivas entre ellas y escapar hacia el aire (evaporación), a su vez, algunas moléculas evaporadas pueden perder energía y regresar al agua (condensación). Cuando las velocidades de evaporación y condensación son iguales, el sistema está en equilibrio. La presión de vapor es la presión parcial ejercida por el vapor de agua sobre el agua líquida, la cual aumenta con el incremento de la temperatura (Crittenden et al., 2012).

5.3. Ley de Henry y la Concentración de saturación o de equilibrio

Al exponer agua subterránea al aire, el oxígeno se difunde y ocurre un continuo intercambio de moléculas en ambas fases hasta que los flujos igualen su magnitud y alcance el equilibrio o su concentración de saturación, dejando de ocurrir un cambio de concentraciones del gas en ambas fases (Pöpel, 1995; Von Sperling, 2005). Para soluciones muy diluidas, la presión parcial de un gas es proporcional a su fracción molar (Ec. 1) (Crittenden et al., 2012).

La distribución en equilibrio de un gas entre una fase líquida y una gaseosa es regida por la Ley de Henry (Kavanaugh & Truseell, 1980), siendo válida para soluciones muy diluidas de fracción molar de hasta 0,05 y concentraciones entre 0,01 y 0,1 mol/L (Hand, Hokanson, & Crittenden, 2002). La concentración del gas en fase líquida se expresa como fracción molar o como concentración según la Ec. 2 (Crittenden et al., 2012).

$$P_A = H_{PX} X_A \quad Ec. 1$$

$$X_A = \frac{n_A}{n_A + n_w} \approx \frac{n_A}{n_w} = \frac{C_A}{C_w}$$

$$C_w = \frac{\rho_w}{PM_w} = \frac{1000 g/L}{18 g/mol} = 55,56 mol/L$$

$$C_A = X_A * C_w \quad Ec. 2$$

P_A : Presión parcial de un gas – 0,209 atm para O_2 –
 H_{PX} : Constante de Henry para el gas en agua (atm)
 X_A : Fracción molar del gas en el agua

La constante de Henry dada en la Ec. 1 en atm, puede expresarse en otras dimensiones para la fase gaseosa y líquida. Para el oxígeno en agua a 20°C, los valores de la constante es: $H_{YC} = 30,75$; $H_{PX} = 41.047,7$ atm; $H_{PC} = 1,354 \times 10^{-3}$ mol/atm*L. La temperatura, presión, fuerza iónica, surfactantes y el pH tienen influencia en el equilibrio entre el aire y el agua y por lo tanto en la solubilidad del O_2 en el agua como se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3. Factores que influyen en la constante de Henry y la solubilidad de los gases

Temperatura	Fuerza iónica	Surfactantes o Tensioactivos	Efecto del pH
La constante de Henry aumenta con la temperatura. Dando mayor volatilidad y menor solubilidad del O_2 y otros gases.	Cuando los sólidos disueltos son altos, la constante de Henry es mayor, dando mayor volatilidad y menor solubilidad de alta fuerza iónica como la de mar. (Hand et al., 2002).	La concentración de tensioactivos en aguas subterráneas es baja y no afecta el diseño de aireadores. Cuando es alta, la recolección de tensioactivos en la interface aire-agua disminuye la fracción molar, la constante de Henry y la solubilidad del O_2 entre un 30 y 50% (Crittenden et al., 2012).	No afecta la constante de Henry pero si la distribución de las especies ionizadas y no ionizadas influyendo en la distribución del gas. Las ionizables influyen en el equilibrio entre aire y agua y sólo las no ionizadas son volátiles.

El cambio en la constante de Henry con la temperatura se puede estimar usando la ecuación de van't Hoff (Ec. 3) (Crittenden et al., 2012).

$$H_{YC} = K_C * e^{-\frac{\Delta H^{\circ} dis}{RT}} \quad Ec. 3$$

K_C : constante – para el $O_2 = 7537$
 $\Delta H^{\circ} dis$: Cambio de entalpia estándar de disolución en agua – $O_2 = 13400$ J/mol
 R : Constante de gas universal – 8.314 J/mol*K

5.4. Tasa de transferencia de oxígeno

Al ser el oxígeno poco soluble en agua, su solubilidad no depende del grado de ionización sino de vencer la fuerza de atracción entre las moléculas de agua (Romero, 2006). Según la teoría de las dos capas de Lewis y Whitman, para garantizar la transferencia de O_2 , es necesario vencer la resistencia del lado líquido de la interface aire-agua (Torrez & Rodriguez, 2014). La tasa de transferencia de O_2 se representa como una reacción cinética de primer orden – Ley de Fick – en la Ec. 4 (de Moel et al., 2006; Montgomery, 1985), se da a una velocidad lineal a la fuerza motriz o déficit de OD ($C_s - C$).

$$\frac{dC}{dt} = K_L a (C_s - C) \quad \text{Ec. 4}$$

$\frac{dC}{dt}$: Tasa de transferencia de O₂ por unidad de volumen, mg/(L·h)

K_La: Coeficiente global de transferencia de gas en líquido (h⁻¹) (a= Área.interfacial/Volumen)

C: Concentración de OD en un tiempo t (mg/L)

La fuerza motriz o déficit de OD, se puede incrementar aumentando la concentración de saturación, la presión de operación o aplicando O₂ puro en lugar de aire. Además, la transferencia de oxígeno puede lograrse con una baja presión o transferencia al vacío (de Moel et al., 2006). El perfil del cambio del OD en el tiempo en un aireador se muestra en la Figura 2, donde aumenta rápidamente al inicio y luego en menor medida porque se reduce la fuerza motriz o déficit de OD (de Moel et al., 2006).

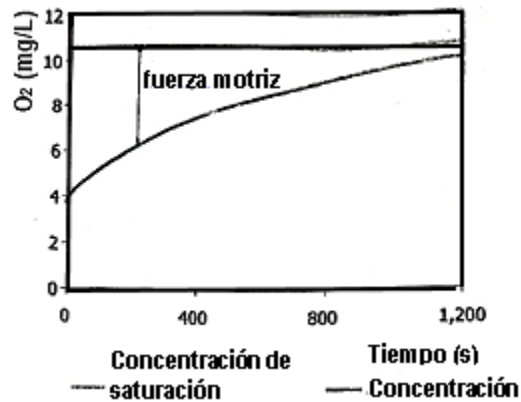


Figura 2. Progreso de la concentración de OD durante la aireación

Fuente: (de Moel et al., 2006).

El coeficiente de eficiencia de aireación se define como la disminución lograda en la fuerza motriz (diferencia entre la concentración de saturación de oxígeno y la concentración existente en un tiempo dado $C_s - C$) dividida por la máxima disminución posible (diferencia entre la concentración de saturación de oxígeno y la concentración inicial $C_s - C_0$) (Ec. 5). El coeficiente K establece la fracción de la concentración de saturación a ser adquirida en la aireación (Von Sperling, 2005).

$$K = \frac{C_{out} - C_0}{C_s - C_0} = 1 - e^{-K_L a * t} \quad \text{Ec. 5}$$

K: eficiencia de transferencia de oxígeno o coeficiente de eficiencia

C_{out}: Concentración de OD después de la aireación

C₀ = concentración de OD en t=0

5.5. Sistemas de aireación

La selección de un aireador se basa en: la eficiencia de transferencia de O₂ requerida, la presión disponible, facilidad de mantenimiento y los costos de inversión y de operación requeridos, donde se busca la mayor eficiencia a una buena relación costo-beneficio. Cuanto menor sea la eficiencia del sistema, mayor será el tamaño de la instalación requerida y el costo de inversión. El costo de operación

es función de la hidráulica del proceso y del método de transferencia del O_2 , donde se debe estimar los costos de energía cuando se consideren equipos mecánicos (Crittenden et al., 2012). El método de transferencia de oxígeno se da básicamente por dos mecanismos: difusión molecular y difusión turbulenta. La difusión molecular prevalece en cuerpos de agua en reposo, este mecanismo es lento y requiere de largo tiempo de transferencia, a diferencia de la difusión turbulenta que es más eficiente ya que involucra la creación y renovación de interfaces aire-agua, facilitando el intercambio de gas (Von Sperling, 2005).

5.5.1. Aireadores de Cascadas o escalonado

Su principio es el uso de la energía potencial del agua para crear interfaces aire-agua, donde el agua fluye por gravedad en capas delgadas por vertederos y se rompe sobre las superficies de escalones o bandejas. La diferencia de altura disponible se subdivide en varias etapas o escalones (Pöpel, 1995). La aireación ocurre en el área de salpicadura, cuanto más grande sea el área horizontal y la altura de caída, más eficiente es la aireación (AWWA, 2010; Romero, 2006).



Figura 3. Aireador en cascada o escalonado. Fuente: (Pöpel, 1995)

Ocurren dos mecanismos de transferencia, cuando el agua se expone al aire cuando fluye en caída libre y cuando el aire se sumerge en la masa de agua, causando la entrada de cantidades significativas de aire dispersado en forma de burbujas a ser absorbido en el agua, dejando una intensa transferencia de gas (Von Sperling, 2005). Los datos de transferencia de O_2 no se encuentran disponibles para este tipo de aireadores, son difícil de predecir por la incertidumbre del contacto aire-agua. Una aproximación ha sido estimar el tiempo de contacto del agua en flujo libre. Si se asume un coeficiente de transferencia de O_2 aproximado y un tiempo de contacto con el oxígeno atmosférico, se podría estimar un grado de absorción del gas (Montgomery, 1985).

5.5.2. Aspirador hidráulico tipo Venturi

La aspiración hidráulica típica se realiza con un aspirador tipo eductor o inyector en el que fluye agua a presión a través de una garganta similar a un tubo Venturi, donde la velocidad del agua aumenta debido al estrechamiento en el área transversal del conducto, creando una condición de baja presión o un vacío parcial, y por ende una atracción o aspiración de aire a través de una abertura en la tubería (ver Figura 4) (Pöpel, 1995). Esta forma de aireación es muy sensible a las variaciones en el flujo, ya que el vacío o aspiración varía con la raíz cuadrada de la velocidad de agua en la garganta del Venturi de Moel et al. (2006). La mayoría de aspiradores hidráulicos son de pequeño tamaño, pero una sola unidad en condiciones favorables de operación puede producir el doble de la velocidad de transferencia de O_2 que los aspiradores mecánicos (Crittenden et al., 2012).

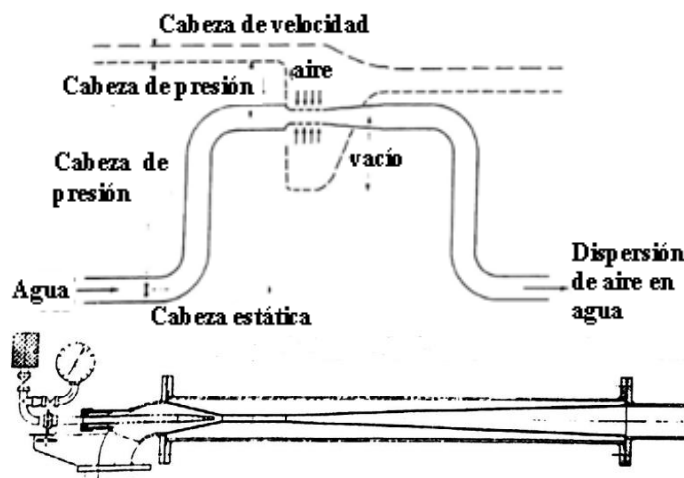


Figura 4. Aspirador tipo Venturi. Fuente: (Pöpel, 1995)

En la Tabla 4 se presentan otros tipos de aireaciones diferentes a los aireadores objeto de estudio en el presente trabajo

Tabla 4. Otros sistemas de aireación

Aireador	Descripción
Aireador de múltiples bandejas	Es una torre de bandejas apiladas, donde se distribuye el caudal hacia la bandeja superior y fluye por los costados o por orificios hacia las bandejas inferiores (Kavanaugh & Truseell, 1980). Pueden ser de corriente de aire natural como las de coque que proporciona más turbulencia por la gran área superficial del coque que provee mayor área de contacto o de corriente de aire forzada como las de listones de madera. La eficiencia depende del espacio entre bandejas, temperatura, carga hidráulica, espesor de la capa de soporte, orificios de las bandejas, etc. (Calderón et al., 2012).
Aireadores de gotas por rocío	Son sistemas diseñados para producir finas gotas mediante rociadores–sprinklers–, proporcionan un tamaño de gota para el tiempo de contacto deseado con el aire. Son un método eficiente para incrementar los niveles de OD y oxidar Fe^{2+} y Mn^{2+} (AWWA, 2010), sin embargo, deben colocarse en grandes embalses o depósitos que requieren gran cantidad de área (Romero, 2006).
Aireación Difusa	Introduce aire con un soplador dentro del agua desde el fondo de un tanque a través de membranas, platos, tubos porosos, fibras o filamentos metálicos. Idealmente se realiza con el flujo de agua descendente y el de las burbujas ascendente (Kavanaugh & Truseell, 1980). Tienen como ventaja una pérdida de carga mínima y menor requerimiento de espacio que los aireadores de gotas y de película delgada, pero tienen un mayor gasto energético debido al soplador. La transferencia puede mejorarse aumentando la profundidad del tanque, produciendo burbujas más pequeñas o mejorando la geometría del contactor (Crittenden et al., 2012).
Dispersión de Aire	Se usan mezcladores o agitadores y un sistema de difusión de aire sumergido. Las propelas ayudan en la mezcla de aire-agua, lo que aumenta la eficiencia de transferencia de O_2 . La salida de aire se ubica a poca distancia del fondo del tanque para reducir la demanda de presión del compresor
Aireadores Mecánicos	Crean nuevas interfaces en la zona aire-agua mediante aireadores de superficie como los de tipo turbina o de cepillo o con bombas de aireación que consisten en un mezclador de turbina o de palas con un tubo de aspiración (Pöpel, 1995), donde se crea un vacío parcial en el impulsor causando la entrada de aire a través del tubo de aspiración donde se mezclan por el impulsor y se descarga por tuberías en el tanque (AWWA, 2010).

6. METODOLOGIA

El desarrollo de este trabajo se dividió en las siguientes etapas:

- Esquemas de aireadores de agua subterráneas de pozo profundo
- Comportamiento de los aireadores en términos de la eficiencia en la transferencia de oxígeno
- Efectos de los parámetros de diseño en la transferencia de oxígeno

En la Figura 5 se presenta un esquema del procedimiento experimental, con el fin de resumir paso a paso las actividades llevadas a cabo para obtener los resultados del estudio.

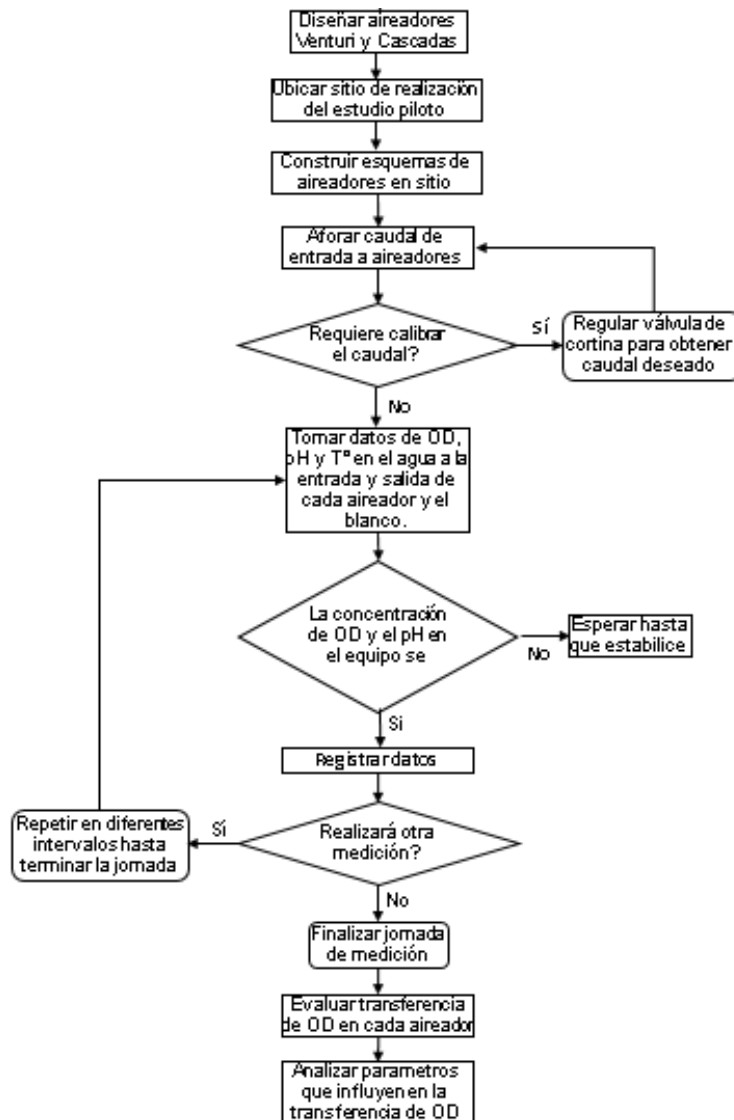


Figura 5. Diagrama del procedimiento experimental

6.1. Esquemas de aireadores de aguas subterráneas de pozo profundo.

Se propuso dos esquemas de aireadores de aguas subterráneas de pozo profundo: un aireador a gravedad de película delgada tipo Cascadas y un aireador por aspiración hidráulica tipo Venturi.

Para determinar la concentración de saturación de OD que podrían alcanzar los aireadores bajo las condiciones de temperatura ($24,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $294,5\text{ K}$) y presión atmosférica ($0,892\text{ atm}$ a 950 msnm) del sitio del estudio piloto, se aplicó la corrección por temperatura a la constante adimensional de Henry aplicando la Ec. 3 con el fin de determinar la fracción molar del oxígeno en agua mediante la Ec. 1 y de esta manera calcular la concentración de saturación oxígeno en agua mediante la Ec. 2.

Los aireadores se diseñaron para lograr una concentración de OD mayor o igual a 4 mg/L en agua de pozo profundo según lo recomendado por MVCT (2010) para agua cruda. Los diseños se realizaron con un caudal de $0,8\text{ L/s}$, teniendo en cuenta diferentes parámetros como: concentración de saturación, presión manométrica, tiempo de contacto, altura de aireador, temperatura, entre otros. Además, se instaló un blanco, que consistía en una tubería sin aireación la cual servía de punto de referencia para observar el cambio de OD con y sin aireación.

Pozo de bombeo de agua subterránea

La construcción de los aireadores y el sitio donde se realizó el estudio piloto fue en la PTAR Cañaveralejo, localizada al nororiente de la ciudad de Cali, Colombia (Figura 6).

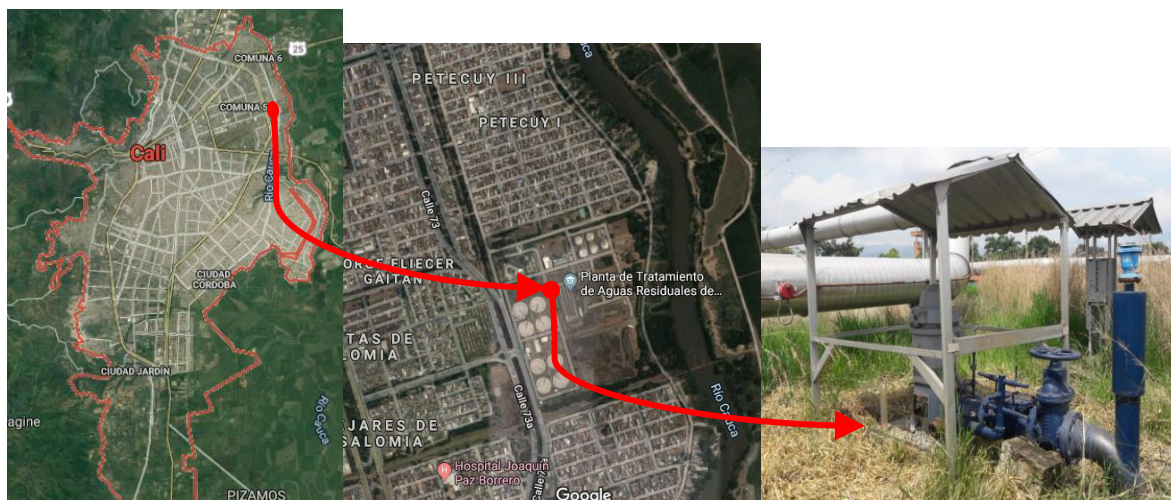


Figura 6. Localización pozo de agua subterránea de la PTAR-C. Fuente: Google Maps

La PTAR-C que trata las aguas residuales municipales de Cali, cuenta con dos pozos de agua subterránea de 180 m de profundidad usados para actividades de operación y mantenimiento, como el retrolavado de las tuberías de la línea de lodos, la preparación de polímero, entre otras. La bomba sumergible del pozo bombea un caudal de 70 L/s hacia un tanque de almacenamiento (EMCALI EICE ESP, 2001). Al ser un pozo de gran profundidad, se consideró apto para realizar el estudio piloto, dado que por su profundidad se considera de bajo contenido de OD. En la Tabla 5 se presentan caracterizaciones de parámetros de interés del agua del pozo para el estudio piloto.

Tabla 5. Parámetros del pozo de agua subterránea.

Fecha	Temperatura (°C)	pH (UND)	Hierro Total (mg/L)	Manganeso (mg/L)	Turbiedad (UNT)	Conductividad (µS/cm)
Abr-2018	22,3	7,44	1,26	0,021	1,44	405,9
Mar-2018	25,4	7,53	0,427	0,064	1,43	437,0
Feb-2018	25,3	7,45	0,625	0,262	1,93	429,0
Ene-2018	24,8	7,13	0,407	0,104	0,83	425,5
Dic-2017	24,0	7,31	0,462	0,121	0,81	429,1
Nov-2017	22,4	7,32	0,460	0,121	0,85	435,8
Oct-2017	24,8	7,70	0,587	0,161	0,76	435,0
Sep-2017	26,3	7,90	0,547	0,139	1,73	413,0
Promedio	24,4	7,4	0,596	0,124	1,22	426,3
Mediana	24,8	7,5	0,5	0,1	1,2	429,0

Fuente: Laboratorio PTAR-C EMCALI

Aireador Venturi

En la Figura 7 se presenta un esquema del aireador Venturi. El aireador se construyó con tuberías PVC en forma de serpentin, soportado sobre las vigas del aireador de cascadas para facilidad de construcción.

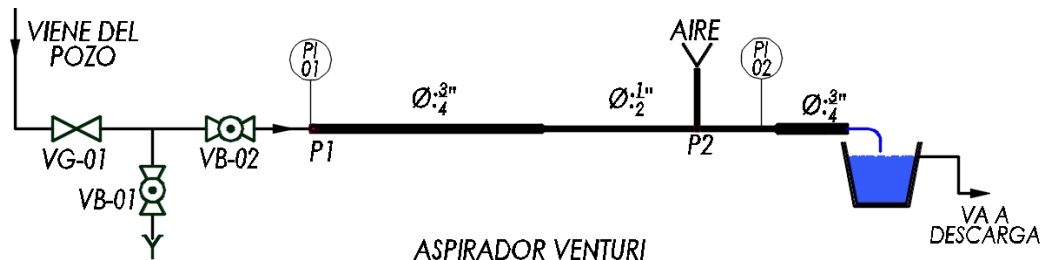


Figura 7. Esquema del aireador Venturi

Con el caudal de diseño (0,8 L/s), se calculó la velocidad en las tuberías PVC empleando el principio de la continuidad (Ec. 6), el cual es un balance de masa que establece la igualdad del caudal en todas las secciones de un conducto (Guevara, 1986). El área transversal de las tuberías, se calculó mediante los diámetros internos presentados por PAVCO (2014).

$$Q = VA = V_1A_1 = V_2A_2 = V_nA_n \quad \text{Ec. 6}$$

Para conocer las variaciones de presión se empleó la ecuación de Bernoulli, que representa las pérdidas de energía que se producen por el desplazamiento del agua entre dos puntos a lo largo de una conducción (Ec. 7). De acuerdo al teorema de Bernoulli (Sears & Zemansky, 2004), a mayor velocidad de un fluido en una conducción, la presión será menor.

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + hf_{1-2} \quad \text{Ec. 7}$$

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + hf_{1-2}$$

$\frac{P_1}{\gamma}$: Energía de presión por unidad de peso (m)

Z_1 : Energía de posición por unidad de peso (m)

$\frac{V_1^2}{2g}$: Energía cinética por unidad de peso (m)

hf_{1-2} : pérdidas de energía entre P_1 y P_2 (m)

La energía total disminuye debido a la fricción del flujo de agua en la tubería y por pérdidas de energía locales provocadas por codos, tees, válvulas, reducciones, entre otros. En conductos cerrados, por razón del movimiento del agua se pierde la energía de presión y la energía cinética si el área del conducto no es constante (Guevara, 1986). La Ec. 8 presenta las pérdidas de energía totales

$$hf_{1-2} = hf_p + hf_s \quad Ec. 8$$

hf_p : Pérdidas de energía primarias o por fricción

hf_s : Pérdidas de energía secundaria o local.

El aireador Venturi se ubicó a una misma altura, por lo tanto al establecer la igualdad de los puntos de referencia P_1 y P_2 (ver puntos en Figura 7), la energía de posición es la misma $Z_1 = Z_2$. La energía de presión en la entrada P_1 para los tres caudales se obtuvo mediante un manómetro instalado en sitio en el punto de conexión del aireador (Figura 8). Esta presión se empleó para diseñar el aireador mediante el cálculo de las pérdidas de energía requeridas para su funcionamiento.

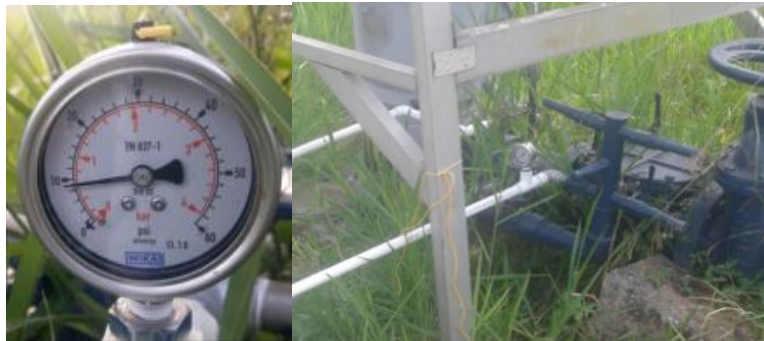


Figura 8. Presión de entrada al aireador Venturi

En el cálculo de las pérdidas de energía primarias en tuberías de diámetro menor a 2", Pérez (2010) y EMCALI EICE ESP (2015) recomiendan la fórmula de Flamant (Ec. 9).

$$Sf_p = \frac{4CV^{1,75}}{\phi^{1,25}} \quad Ec. 9$$

$$hf_p = L * Sf_p$$

Sf_p : Gradiente hidráulico o pérdida de carga unitaria (m/m)

C: Coeficiente de fricción (0,0001 para PVC)

Las pérdidas de energía locales se calcularon por el método de coeficiente de resistencia K, donde la energía empleada en vencer las resistencias locales es directamente proporcional a la energía cinética

$$hf_s = \sum K * \frac{V^2}{2g} \quad Ec.10$$

Aireador de Cascadas

Figura 9. Aireador de Cascadas

15

superficie del agua de la bandeja receptora, además, al ser la primera etapa, el déficit de OD es mayor, por lo tanto la tasa de transferencia es mayor que en las siguientes etapas.

Mediante la Ec. 11 se calculó el tiempo de caída o de contacto con el aire por cada etapa (Sears & Zemansky, 2004) y la velocidad de caída del agua con la Ec. 12 (de Moel et al., 2006).

$$h = \frac{1}{2}gt^2 \quad \rightarrow \quad t = \sqrt{2h/g} \quad Ec. 11$$

$$v = \sqrt{2gh} \quad Ec. 12$$

h: altura de caída del agua (m)

g: aceleración de la gravedad: 9,81 m/s²

Para aireadores a gravedad, la concentración de oxígeno efluente se puede estimar basándose en el coeficiente de eficiencia (K) (Ec. 5), por lo tanto se calculó el coeficiente de eficiencia del primer escalón para obtener una concentración de salida de 2,21 mg/L partiendo de una concentración inicial de OD de 1,0 mg/L.

$$K = \frac{2,21 - 1,0}{7,31 - 1,0} = 0,192$$

El coeficiente de eficiencia es de 19,2 %, que es la fracción de la concentración de saturación a ser adquirida en la aireación en esta primera etapa o caída. Al ser un aireador en secuencias donde el agua hace el mismo movimiento de caída, la eficiencia es igual en cada etapa (de Moel et al., 2006). Reordenando la Ec. 5, se calculó la concentración de salida en los escalones siguientes:

$$C_{out} = 2,21 + 0,192(7,31 - 2,21) = 3,19 \text{ mg/L}$$

$$C_{out} = 3,19 + 0,192(7,31 - 3,19) = 3,98 \text{ mg/L}$$

Por lo tanto, para obtener una concentración de salida de 4mg/L se requieren mínimo 3 escalones o bandejas. Para este sistema que consiste en varias caídas libres, el coeficiente de eficiencia general de la secuencia de etapas se determinó basado en el coeficiente de eficiencia por etapa con la Ec. 13.

$$K = 1 - [(1 - K_1).(1 - K_2) \dots (1 - K_n)] \quad Ec. 13$$

$$K = 1 - [(1 - 0,192)(1 - 0,192)(1 - 0,192)] = 0,472$$

Es decir, que el coeficiente de eficiencia general K del aireador es de 47,2%, fracción de la concentración de saturación a ser adquirida en total por el aireador de Cascadas.

de Moel et al (2006) recomienda una profundidad mínima del agua por bandeja del 66% de la altura de caída para obtener un tiempo de contacto suficiente, sin embargo, para el presente diseño se redujo esta profundidad para aumentar el ancho de la bandeja y por ende el área superficial de contacto, ya que entre mayor sea esta área, puede obtener mayor transferencia de OD.

El caudal que fluye por los vertederos rectangulares de pared delgada con contracciones laterales en las bandejas se calculó mediante la Ec. 14 (Marbello, n.d.). El valor del coeficiente C_d se calculó

mediante la ecuación de Brashmann Ec. 15 (Marbello, n.d.), la cual no presenta restricciones o condiciones en sus parámetros para su aplicación.

$$Q = \frac{2}{3} C_d \left(b \frac{2h}{10} \right) \sqrt{2g} * h^{\frac{3}{2}} \quad Ec. 14$$

$$C_d = 0,5757 + 0,0579 \frac{b}{B} + \frac{0,000795}{h} \quad Ec. 15$$

C_d : Coeficiente de descarga (m^{-1})

b : longitud o ancho de la cresta del vertedero (m)

B : ancho del canal o bandeja (m)

h : carga del vertedero (m)

Procedimiento y toma de datos en sitio de experimento

El acople de los aireadores al pozo se realizó a través de dos derivaciones de la tubería que cuentan con conexión MNTP en hierro de $\varnothing$: $\frac{3}{4}$ " y $\frac{1}{2}$ " respectivamente.

Con el fin de regular el flujo de agua de entrada se instaló una válvula tipo cortina en la tubería de entrada a cada aireador y se instaló una derivación con válvulas tipo bola para realizar aforo volumétrico empleado como toma muestras para la medición de datos inicial.

Antes de la toma de datos, se realizó el aforo volumétrico de cada aireador cerrando el paso del agua y abriendo la válvula de la derivación del aireador. Se reguló la válvula de cortina hasta obtener el caudal de operación deseado para la prueba. Una vez obtenido el caudal, se abrió la válvula de entrada hacia cada aireador y se cerró la válvula de la derivación para normalizar.

La toma de datos se realizó mediante un medidor de sensores polarográficos multiparamétrico marca WTW Multi 3400. Este tipo de medidor es frecuentemente usado para medir OD en la evaluación de sistemas de aireación (Baquero, 2015). Las mediciones se realizaron con la metodología descrita en el Standard Methods por APHA (2012), ICONTEC (2013) e ICONTEC (2012) dadas en la Tabla 6.

Tabla 6. Métodos para medición de parámetros

Parámetro	Equipo	Método
Temperatura	Termómetro centígrado con intervalos de 0,5°C	2550 - B
Oxígeno Disuelto	Medidor de oxígeno con electrodo de membrana (polarográfico o galvánico)	NTC 4705
pH	pHmetro por electrometría	4500 H+ B

La toma de datos de OD, pH y temperatura inicial se realizó en el mismo recipiente aforador en cada aireador, al cual se introdujo la tubería de derivación hasta el fondo y se dejó desbordar de agua para evitar que se produjera turbulencia que generara aireación y alterara el valor a registrar por el equipo (ver Figura 10). La medición de OD, pH y temperatura final se realizó en un recipiente que recolectaba el agua una vez pasaba por los aireadores.

La primera medición de datos de OD, pH y temperatura se realizó para un tiempo de 12 horas en intervalos de 30 minutos, los datos de OD, pH y T° en cada ensayo se registraron una vez la lectura

de la concentración de OD se estabilizaba en el equipo. Con base en este primer registro de datos, se programó el número de mediciones adicionales. Dos de las mediciones de datos, se realizaron bajo otros dos escenarios de caudal diferentes al caudal de diseño (0,6 y 1,0 L/s) con el fin de poder observar si se presenta influencia del caudal en el comportamiento del OD ya que en los sistemas de tratamiento de agua para consumo los caudales fluctúan entre valores máximos y mínimos. Se realizaron 6 días de mediciones de datos distribuidos en diferentes horarios cada día.



Figura 10. Toma de datos de OD, pH y Temperatura inicial con equipo de medición

En la Figura 11 se presenta un diagrama del proceso con los aireadores donde se esquematiza la instalación realizada en el sitio de estudio.

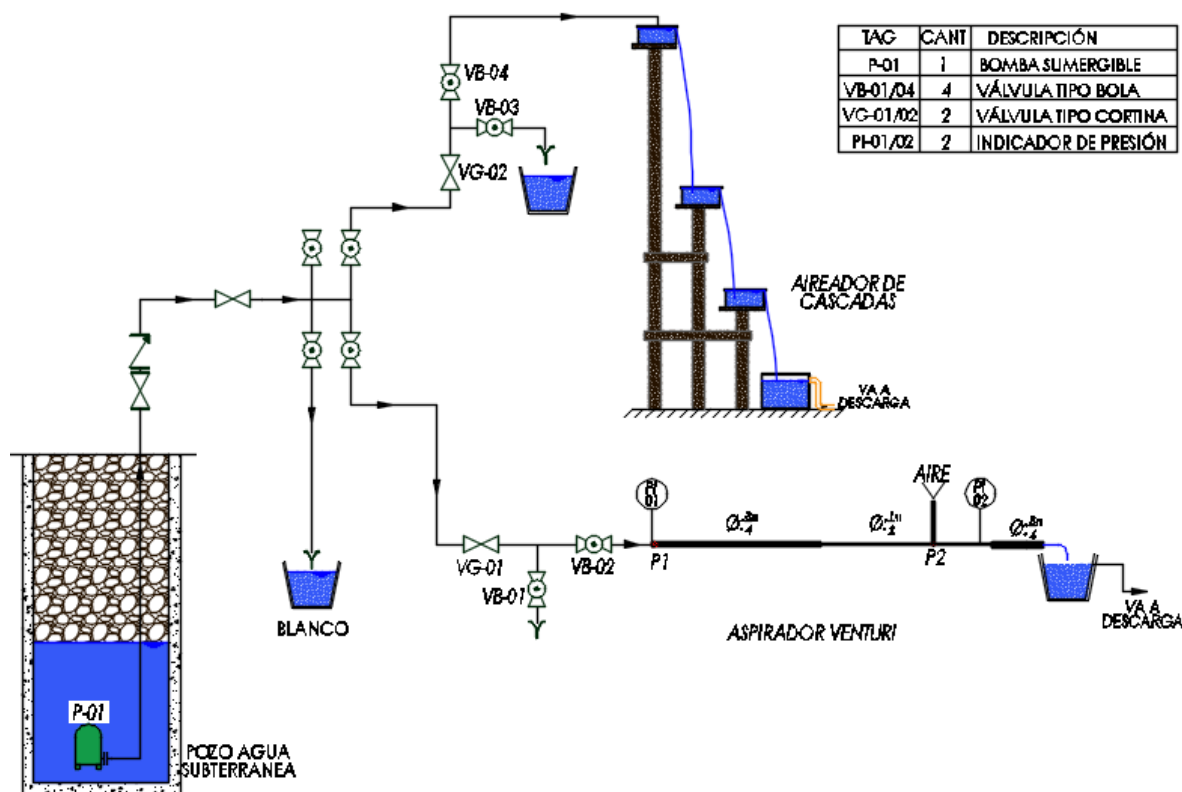


Figura 11. Diagrama del proceso de los aireadores

6.2. Comportamiento de aireadores en términos de eficiencia de transferencia de oxígeno.

Con los datos de OD, pH y temperatura tomados en sitio del experimento, se estudió el comportamiento de los esquemas de aireadores en términos de transferencia de oxígeno a la masa de agua, para esto se analizó las concentraciones de OD a través del tiempo y la influencia de la temperatura y el pH. Por último, se analizó cuales parámetros de diseño tienen mayor efecto en la transferencia de oxígeno.

Se realizó un análisis de los datos obtenidos de OD, pH y temperatura para cada aireador mediante indicadores estadísticos bajo los tres escenarios de caudal (0,6 - 0,8 y 10, L/s). Este análisis contribuyó a visualizar previamente los datos a manera de detectar similitudes entre las variables de estudio e identificar datos atípicos como primera instancia del análisis.

Se graficó las concentraciones de OD logradas en función del tiempo por el aireador de cascadas, el aireador Venturi y el blanco revisando la influencia de las variables temperatura y pH en la concentración de OD lograda.

Posteriormente, se realizó un análisis de la varianza (ANOVA) con el fin de determinar si las variables temperatura, pH y tipo de aireador utilizado influyen en la variable de respuesta OD; esta prueba se realizó para los caudales evaluados (0,6 – 0,8 – 1,0 L/s).

Para realizar el ANOVA, se examinó los datos con la necesidad de comprobar si estos indican el cumplimiento de los tres supuestos que rigen dicho análisis:

- Normalidad: Los errores (ϵ_{ijk}) tienen distribución Normal.
- Homocedasticidad: Los errores (ϵ_{ijk}) tienen la misma varianza (varianza constante) σ^2
- Independencia: Los errores (ϵ_{ijk}) son independientes (no presentan correlación)

En el análisis de los supuestos se evidenció el cumplimiento de la normalidad, donde los residuales están próximos a la recta ajustada o valores cuantílicos de la distribución normal. El supuesto de homocedasticidad evidencia una relación lineal entre las variables de interés y también contrasta la varianza constante de los residuales. El supuesto de independencia denotó que no existe correlación entre los errores.

El análisis estadístico se llevó a cabo mediante el software estadístico R Studio de licencia libre para desarrollar un diseño experimental factorial que puede describirse como un modelo explicativo que establece la significancia de las variables temperatura, pH y tipo de aireador sobre el OD.

El modelo más frecuente es el de efectos, el cual establece la relación entre los factores (temperatura, pH y tipo de aireador) sobre la variable de respuesta OD. Estos factores son tratados como variables independientes o regresoras y el OD como variable de respuesta o dependiente. El modelo factorial se determina como:

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + Z_k + \epsilon_{ijk}$$

Donde:

i=1,...,a; j=1,...,b; k=1,...,n

y_{ijk} : Variable dependiente (OD)

μ Es el efecto medio global

α_i Es el efecto incremental sobre la media causada por el nivel i del factor A (temperatura)

$-\beta_j$ el efecto incremental sobre la media causado por el nivel j del factor B (tipo de aireador)

$-Z_k$ el efecto incremental sobre la media causado por el nivel j del factor C (pH)

$-\varepsilon_{ijk}$ el término del error.

En el estudio se contrastaron las siguientes hipótesis:

$$H_o: \alpha_1 = \alpha_2 = \dots \alpha_a = 0 \text{ (la temperatura no influye)}$$

$$H_1: \text{algún } \alpha_i \neq 0 \text{ (la temperatura influye)}$$

$$H_o: \beta_1 = \beta_2 = \dots \beta_b = 0 \text{ (el tipo de aireador no influye)}$$

$$H_1: \text{algún } \beta_j \neq 0 \text{ (el tipo de aireador influye)}$$

$$H_o: Z_1 = Z_2 = \dots Z_c = 0 \text{ (el pH no influye)}$$

$$H_1: \text{algún } Z_k \neq 0 \text{ (el pH influye)}$$

Finalmente, se realizaron graficas de efectos principales sobre cada factor evaluado (OD, temperatura, tipo de aireador y pH) para determinar la efectividad de cada aireador.

Tabla 7. Análisis de la varianza

F. V.	S. C.	G. L.	M. C.	F
Factor A	SC_A	$a - 1$	$MC_A = \frac{SC_A}{a-1}$	$F_A = \frac{MC_A}{MC_E}$
Factor B	SC_B	$b - 1$	$MC_B = \frac{SC_B}{b-1}$	$F_B = \frac{MC_B}{MC_E}$
Interacción	SC_{AB}	$(a - 1)(b - 1)$	$MC_{AB} = \frac{SC_{AB}}{(a-1)(b-1)}$	$F_{AB} = \frac{MC_{AB}}{MC_E}$
Residual	SCE	$ab(n - 1)$	$MC_E = \frac{SCE}{ab(n-1)}$	
Total	SCT	$abn - 1$		

Donde:

F.V.: es la fuente de variación del modelo

S.C.: es la suma de cuadrados

G.L. grados de libertad

M.C.: cuadrados medios

F: Valor-F

Con los resultados obtenidos del análisis anterior, se analizó que parámetros de diseño tuvieron mayor influencia en la transferencia de O_2 y que parámetros se podrían mejorar con el fin de aumentar la concentración final de OD.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos presentan los diseños realizados para el aireador Venturi y Cascadas, su construcción y posterior toma de datos en el pozo de agua subterránea de la PTAR-C. Posteriormente se presenta el análisis del comportamiento de cada aireador y de los parámetros que influyen en las concentraciones de OD obtenidas.

7.1. Esquemas del aireador tipo Venturi y el aireador de Cascadas

Concentración de Saturación de Oxígeno (Cs)

Inicialmente, se calculó la concentración de saturación de OD para las condiciones locales en el agua del pozo de la PTAR-C. La constante adimensional de Henry a 24,5°C se calculó mediante la Ec. 3 dando un valor de $H_{YC} = 33,45$, que expresada en unidades de atm es $H_{PX} = 45.333,9$ atm, con la que se determinó la fracción molar del oxígeno en agua para obtener la concentración de saturación de oxígeno en agua mediante la Ec. 1. Dando un valor de $4,11 \times 10^{-6}$. Por lo tanto, la concentración de saturación de oxígeno en agua calculada con la Ec. 2 es de 7,31 mg/L en el sitio de estudio.

7.1.1. Aireador tipo Venturi

Para el caudal de diseño de 0,8 L/s, en la Tabla 8 se presentan los diámetros y longitud de tubería del aireador, la velocidad, las pérdidas de carga unitaria y las pérdidas totales por fricción o pérdidas primarias del aireador Venturi. Las pérdidas secundarias o pérdidas locales del aireador Venturi se presentan en la Tabla 9.

Tabla 8. Cálculos de velocidad y pérdidas de energía primarias

Caudal	L/s	m³/s	Presión en P ₁	PSI	mca				
	0,80	8x10 ⁻⁴		9,00	6,33				
Diámetro Nominal		Diámetro interior		Área	Velocidad	Energía Cinética	Perdidas unitarias	Longitud tubería	Perdidas Primarias
in	mm	mm	m	m²	m/s	mca	m/m	m	mca
3/4	26	23,63	0,0236	0,00044	1,82	0,170	0,124	5,00	0,62
1/2	21	18,18	0,0182	0,00026	3,08	0,484	0,430	7,20	3,09
							Total	12,20	3,71

Tabla 9. Valores de K y pérdidas locales o por accesorios del aireador Venturi

Accesorio	Cantidad	K	h _{fs} (mca)
Codo 90° Roscado 3/4"	1	1,50	0,25
Valv. Compuerta 3/4"	1	7,40	1,26
Tee paso directo 3/4"	1	0,20	0,03
Tee salida lateral 3/4"	1	1,00	0,17
Valv. Bola 3/4"	1	0,05	0,01
Unión extremos lisos 3/4"	1	0,04	0,01
Unión extremos roscados 3/4"	4	0,08	0,05
Codo 90° extremo liso 3/4"	7	0,30	0,36
Reducción brusca 3/4" - 1/2"	1	0,17	0,08
Codo 90° extremo liso 1/2"	13	0,30	1,89
Tee paso directo 1/2"	1	0,20	0,10
Total hfs			4,21

Valores de K adaptados de (Guevara, 1986) y (Munson, Okiishi, Huebsch, & Rothmayer, 2013)

Estos cálculos de pérdidas por fricción y locales se realizaron para los otros 2 caudales de prueba (0,6 y 1,0 L/s), sus valores se presentan en el Anexo 2.

Obtenidos los valores de pérdidas de energía primarias y secundarias, mediante la Ec. 8 se obtuvo el total de pérdidas de energía H_{f1-2} y de la Ec. 7 la presión manométrica en el punto de aspiración P_2 . La presión absoluta en el punto P_2 se calculó con una presión atmosférica local de 9,22 mca. Los resultados para cada caudal de prueba se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10. Pérdida de energía total y presiones en el punto de aspiración P_2

Caudal (l/s)	H_{f1-2} (mca)	Presión manométrica en P_2 (mca)	Presión absoluta en P_2 (mca)
0,8	7,91	-1,90	7,32
0,6	5,05	1,11	10,33
1,0	11,42	-5,58	3,64

La presión efectiva tiene un valor negativo (-1,90 mca) en el punto P_2 , por lo tanto la presión absoluta es menor que la atmosférica y en vez de brotar agua por la abertura en la tubería, permite la entrada o aspiración de aire debido a la presión de vacío que se produce a través de una manguera flexible instalada en la tubería (ver Figura 12). Además, la presión absoluta es mayor a la presión de vapor del agua a 24,5 °C (0,314 mca) (Marquez, 1991), lo que evita una condición crítica dentro del aireador, evitando que ocurra cavitación (Guevara, 1986).



Figura 12. Instalación de manguera de aspiración



Figura 13. Instalación aireador Venturi

Teniendo en cuenta que la concentración de saturación de OD es de 7,31 mg/L, se calculó el coeficiente de eficiencia del aireador teórico mediante la Ec. 5 para el valor de referencia de la guía de concentración de OD C_{out} de 4 mg/L asumiendo una concentración inicial de OD de 1 mg/L. dando

un valor de 0,475 (47,5%) de transferencia de O_2 en el aireador respecto a la eficiencia requerida para lograr la concentración de saturación.

7.1.2. Aireador de Cascadas

Las bandejas empleadas en el aireador piloto se observan en la Figura 14. En la Tabla 11 se presentan las dimensiones de las bandejas, la longitud, caudal, número de vertederos por bandeja y la carga hidráulica por bandeja del aireador.

Tabla 11. Dimensiones de bandejas del aireador de cascada

Parámetro	Valor	Unidad
Profundidad (y)	0,125	m
Largo interno (l)	0,255	m
Ancho interno (B)	0,33	m
Volumen útil	9,76	L
Longitud del vertedero (b)	0,03	m
Carga del vertedero (h)	0,016	m
Coefficiente de descarga C_d	0,63	m^{-1}
Caudal por vertedero (Q)	0,000114	m^3/s
Numero de vertederos	7	Und
Caudal total	0,8	L/s
Carga hidráulica por bandeja	821	m^3/m^2*d



Figura 14. Construcción Aireador de cascadas

En la Tabla 12 se presentan la altura de caída, velocidad, tiempo de caída y tiempo total (suma del tiempo de caída y tiempo de retención en cada bandeja), el coeficiente de eficiencia y concentración de OD en cada una de las etapas del aireador de cascada.

Tabla 12. Altura, velocidad y tiempos de caída de aireador cascadas

	Altura caída (m)	Velocidad (m/s)	Tiempo de caída (s)	Tiempo total (s)	K	C _{out} mg/L
Etapla 1	1,10	4,65	0,47	12,67	0,192	2,21
Etapla 2	0,70	3,71	0,38	12,58	0,192	3,19
Etapla 3	0,60	3,43	0,35	12,55	0,192	3,98
Total	2,40		1,20	37,8	0,472	

7.2. Comportamiento de aireadores en términos de transferencia de oxígeno

7.2.1. Análisis de datos

Como vista previa del estudio se realizó un análisis de datos que consiste en un estudio descriptivo de las variables medidas en campo con el fin de observar patrones de comportamiento entre las variables y puntos atípicos. En la Tabla 13 se presenta los diferentes indicadores estadísticos.

Tabla 13. Estadísticas descriptivas para el agua cruda y efluente de los aireadores y el blanco

Fecha	Caudal (l/s)	N° datos	Indicadores Estadísticos	Agua cruda			Aireador Venturi		Aireador Cascadas		Blanco
				OD (mg/L)	pH	T°	pH	OD (mg/L)	pH	OD (mg/L)	OD (mg/L)
14-may-18	0,8	25	Promedio	0,69	7,16	26,05	7,44	2,19	7,85	5,39	1,00
			Mediana	0,70	7,19	26,10	7,45	1,98	7,86	5,44	1,00
			Máximo	0,98	7,26	27,10	7,51	3,43	7,96	6,05	1,30
			Mínimo	0,42	6,99	24,80	7,38	1,72	7,62	4,38	0,70
			Varianza	0,032	0,006	0,435	0,002	0,210	0,008	0,242	0,023
			Desv. Estand	0,180	0,077	0,660	0,040	0,458	0,092	0,492	0,150
			Coefi. Variac.	0,261	0,011	0,025	0,005	0,209	0,012	0,091	0,150
15-may-18	0,8	13	Promedio	0,55	7,21	25,06	7,43	2,99	7,72	5,47	0,86
			Mediana	0,54	7,21	25,20	7,43	3,00	7,71	5,59	0,87
			Máximo	0,68	7,25	25,50	7,50	3,56	7,82	6,33	0,97
			Mínimo	0,42	7,18	24,30	7,36	2,28	7,61	4,53	0,72
			Varianza	0,007	0,001	0,154	0,001	0,210	0,004	0,411	0,005
			Desv. Estand	0,086	0,025	0,393	0,038	0,458	0,061	0,641	0,071
			Coefi. Variac.	0,156	0,004	0,016	0,005	0,153	0,008	0,117	0,082
19-may-18	0,8	13	Promedio	0,45	7,35	25,66	7,43	2,23	7,88	4,85	0,95
			Mediana	0,46	7,35	25,80	7,43	2,11	7,90	4,80	0,95
			Máximo	0,52	7,40	26,40	7,50	3,15	7,95	5,31	1,05
			Mínimo	0,36	7,30	24,80	7,36	1,46	7,80	4,57	0,86
			Varianza	0,002	0,001	0,341	0,001	0,391	0,002	0,063	0,003
			Desv. Estand	0,050	0,032	0,584	0,038	0,626	0,046	0,251	0,052
			Coefi. Variac.	0,110	0,004	0,023	0,005	0,280	0,006	0,052	0,054
20-may-18	1,0	16	Promedio	0,42	7,05	25,77	7,15	2,16	7,63	4,77	0,55
			Mediana	0,43	7,05	25,80	7,13	2,12	7,60	4,64	0,56
			Máximo	0,50	7,15	26,20	7,34	2,82	7,76	5,58	0,62

				Agua cruda			Aireador Venturi		Aireador Cascadas		Blanco
Fecha	Caudal (l/s)	N° datos	Indicadores Estadísticos	OD (mg/L)	pH	T°	pH	OD (mg/L)	pH	OD (mg/L)	OD (mg/L)
			Mínimo	0,31	6,97	25,20	7,05	1,78	7,55	4,41	0,45
			Varianza	0,003	0,003	0,098	0,008	0,098	0,004	0,108	0,002
			Desv. Estand	0,052	0,054	0,314	0,090	0,312	0,061	0,329	0,049
			Coefi. Variac.	0,126	0,008	0,012	0,013	0,144	0,008	0,069	0,088
26-may-18	0,8	49	Promedio	0,65	7,07	24,91	7,22	2,92	7,61	5,48	0,84
			Mediana	0,54	7,08	24,70	7,20	2,59	7,60	5,07	0,77
			Máximo	1,16	7,25	27,00	7,38	4,15	7,84	7,03	1,35
			Mínimo	0,27	6,84	23,30	7,05	2,27	7,41	4,33	0,45
			Varianza	0,057	0,009	1,570	0,010	0,374	0,011	0,864	0,053
			Desv. Estand	0,238	0,093	1,253	0,097	0,612	0,106	0,929	0,229
			Coefi. Variac.	0,366	0,013	0,050	0,014	0,210	0,014	0,170	0,272
28-may-18	0,6	13	Promedio	0,64	7,11	24,86	7,23	3,11	7,65	5,53	0,83
			Mediana	0,65	7,11	24,80	7,22	3,00	7,62	5,59	0,84
			Máximo	0,86	7,18	25,40	7,29	3,50	7,77	6,20	1,03
			Mínimo	0,44	7,05	24,30	7,17	2,79	7,58	4,99	0,59
			Varianza	0,015	0,001	0,151	0,001	0,057	0,003	0,147	0,022
			Desv. Estand	0,124	0,033	0,388	0,033	0,239	0,055	0,384	0,147
			Coefi. Variac.	0,192	0,005	0,016	0,005	0,077	0,007	0,069	0,178

Se observa que el promedio y la mediana del OD a la salida del aireador de Cascadas fueron mayores al del aireador Venturi en todas las pruebas. Además, ambos aireadores lograron un incremento en el OD, en comparación con el blanco, el cual no representó mayor incremento en la concentración lo que demuestra la influencia de los aireadores en la transferencia de oxígeno.

Los valores promedio y mediana de OD para los caudales de 0,6 y 1,0 L/s fueron similares a los valores para el caudal de diseño en ambos aireadores como se observa en la Tabla 13, lo que refleja que no hay una diferencia significativa de los valores de OD entre los 3 caudales de prueba.

Al observar el comportamiento del pH, se incrementa entre la entrada y salida de ambos aireadores, siendo mayor el incremento en el aireador de Cascadas respecto al Venturi. Este incremento del pH puede estar asociado al incremento del OD en el agua, ya que al remover gases disueltos como el CO₂ H₂S y compuestos volátiles en la aireación, podría producir un incremento en el pH favoreciendo la oxidación del Fe y Mn (Loaiza, 2009; Oh et al., 2014).

Para analizar el comportamiento del OD y el pH en el tiempo, se presentan las curvas de OD, pH y temperatura para los tres escenarios de caudal evaluados. Las curvas con el caudal de diseño 0,8 L/s se presentan la Figura 15 y Figura 16. Estas gráficas se construyeron promediando los valores registrados en las mismas horas en los diferentes días de ensayo con este caudal. En el Anexo 3 se presentan las curvas de OD, pH y temperatura de cada ensayo realizado en campo.

En la Figura 15 se observa que la concentración de salida de OD del aireador de Cascadas fue mayor que en el aireador Venturi; el aireador de Cascadas presentó valores de OD por encima del valor de referencia (4 mg/L) según MVCT, (2010) mientras que el Venturi no. Además, se observa que al

transcurrir la jornada desde las 06:30 am, la temperatura del agua aumentó durante la mañana y comenzó a decrecer en el transcurso de las horas de la tarde, reflejándose una influencia inversa con las concentraciones de OD logradas para los dos aireadores, este comportamiento demuestra gráficamente que la temperatura tiene una influencia inversa en la transferencia del oxígeno en agua en concordancia con (AWWA, 2002; Crittenden et al., 2012; Montgomery, 1985; Pöpel, 1995).

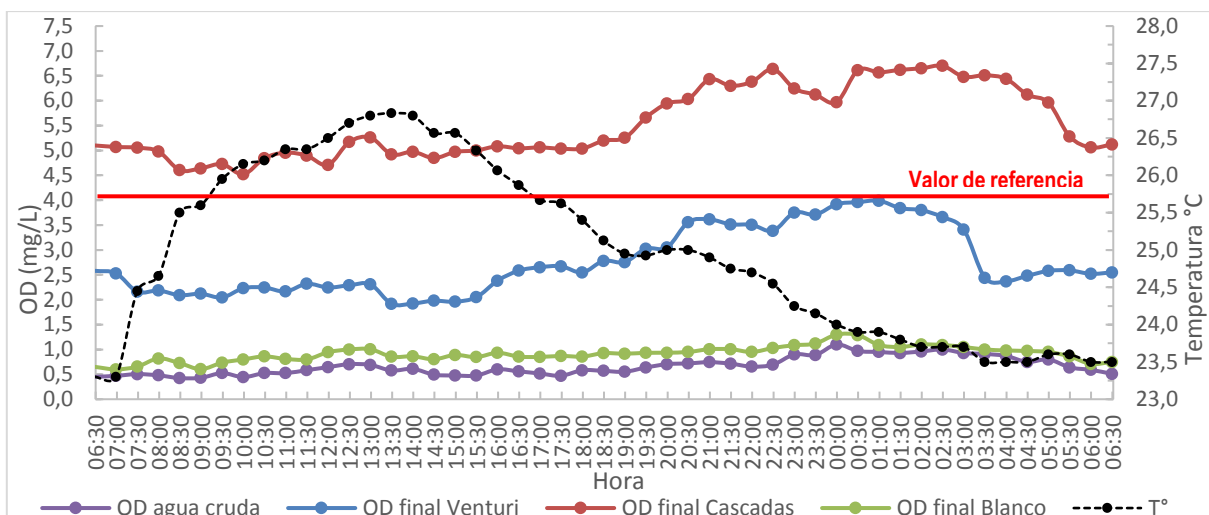


Figura 15. Curva de OD para caudal 0,8 L/s

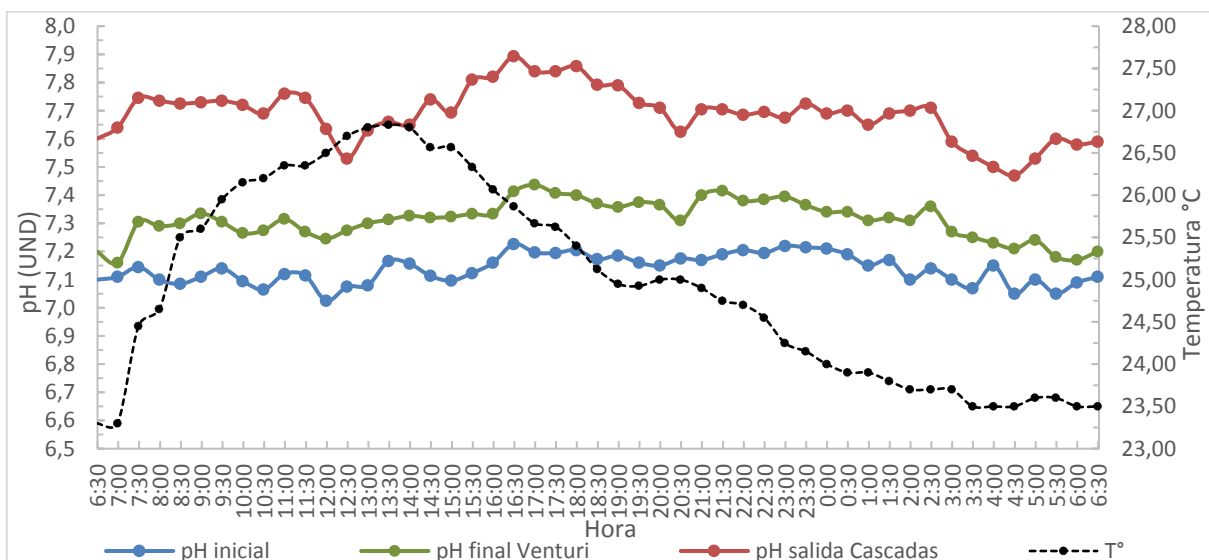


Figura 16. Curva de pH y temperatura para caudal 0,8 L/s

Al relacionar la Figura 16 y la Figura 15 se observa que los valores del pH del agua tienden a aumentar a medida que las concentraciones de OD aumentan. La curva de pH de salida del aireador de cascadas es mayor a la del aireador Venturi, ya que la concentración de salida de OD del aireador de cascadas es mayor a lo largo del tiempo. Esto permite observar que la aireación del agua subterránea incrementa el pH ya que permite la liberación o desorción de sustancias volátiles y gases como el CO_2 ,

H₂S, entre otros que se encuentran presentes en mayor concentración en las aguas de pozo profundo. Esta descarbonatación subsecuentemente causa que el agua incremente el pH (Oh et al., 2014).

La prueba con el caudal de 0,6 L/s presenta el mismo comportamiento respecto a la concentración de OD y la temperatura que para el caudal de diseño en los dos aireadores como se presenta en la Figura 17. El aireador de cascadas obtuvo concentraciones de OD por encima del valor de referencia mientras que el aireador Venturi no lo logró. Al disminuir la temperatura el OD reportó mayores valores, sin embargo, en la Figura 18 se observa que los valores de pH incrementaron para ambos aireadores pero no se reflejó una relación entre los valores del pH del agua y de OD de la Figura 17 como se observó en la Figura 16 y la Figura 15 para el caudal de diseño.

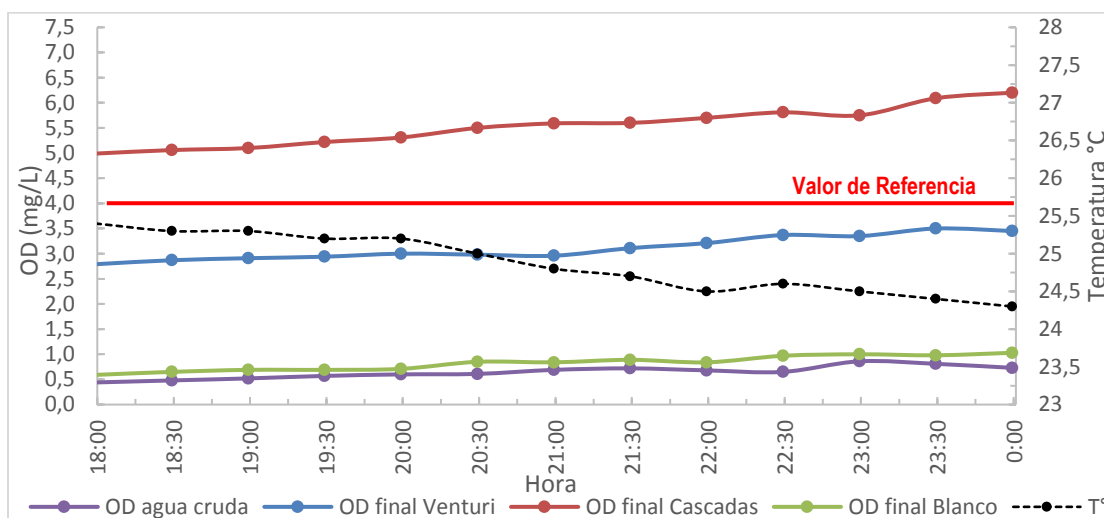


Figura 17. Curva de OD para caudal 0,6 L/s

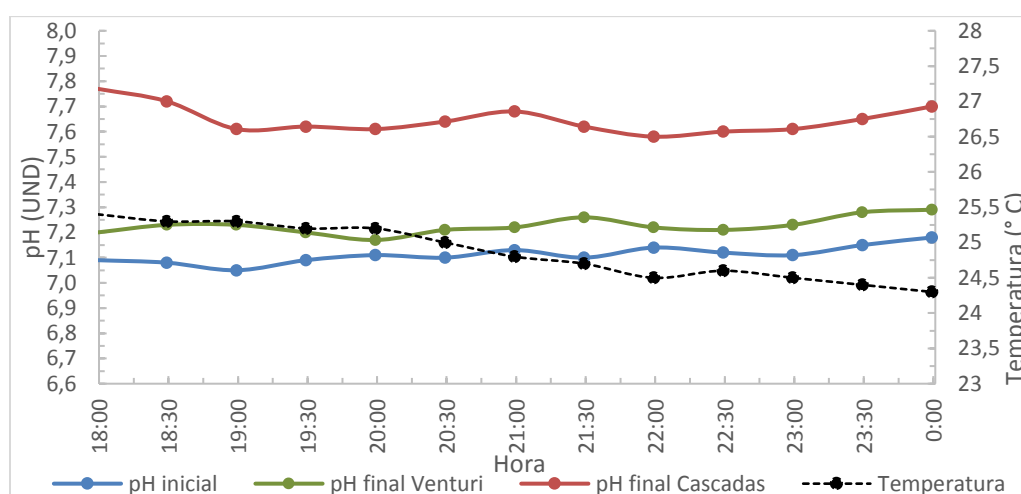


Figura 18. pH y temperatura para caudal 0,6 L/s

Para el caudal de 1,0 L/s, la Figura 19 no evidencia una relación muy notable entre el OD y la temperatura como se observó en los otros dos caudales, sin embargo nuevamente el aireador de cascadas obtuvo mayores valores de OD respecto al Venturi y por encima del valor de referencia.

Además, en la Figura 20 los valores de pH no presentan una relación directa con los valores de OD de la Figura 19.

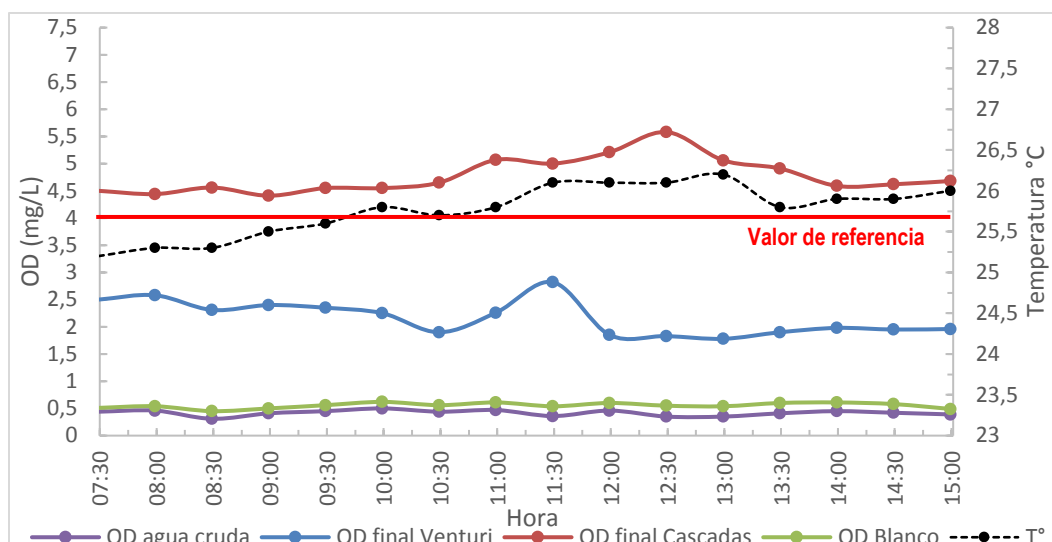


Figura 19. Curva de OD para caudal 1,0 L/s

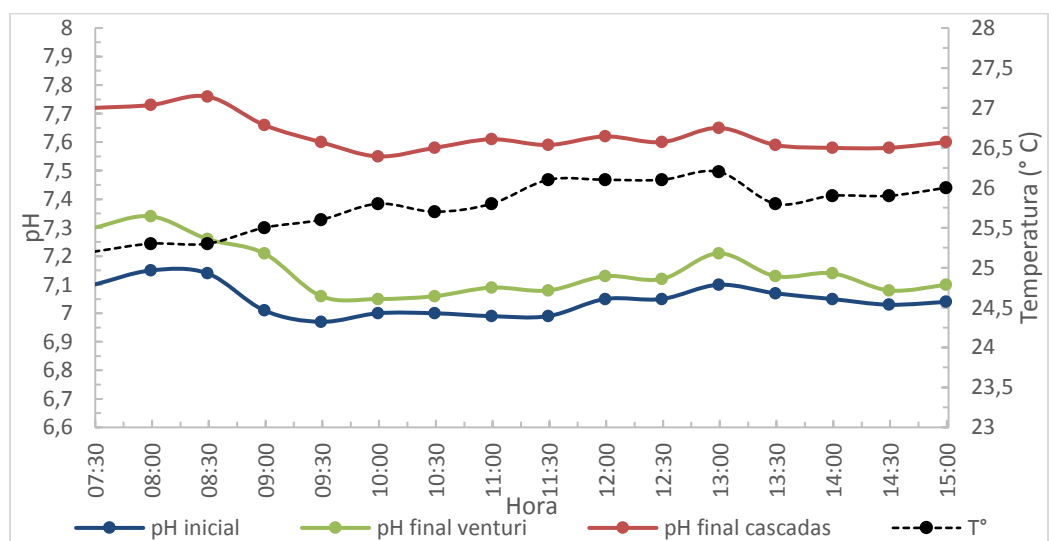


Figura 20. pH y temperatura para caudal 1,0 L/s

Diagramas de Cajas para las dos tecnologías de aireación

En la Figura 21 y la Figura 22 se presentan diagramas de cajas del OD y el pH para el caudal de diseño de 0,8 L/s. En la Figura 21 se evidencia resultados más eficientes para el aireador de Cascadas en términos de OD con un valor de la mediana alrededor de 5,1 mg/L en contraste con la mediana del aireador Venturi que se encuentra alrededor de 2,7 mg/L.

Por lo tanto, el coeficiente de eficiencia dio un resultado para el aireador de Cascadas de 0,728 (72,8%), valor superior al coeficiente de eficiencia teórico (0,472) y para el aireador Venturi fue de 0,314 (31,4%), valor inferior al teórico (0,475).

Respecto al pH de salida en la Figura 22, se tiene que el sistema de cascadas alcanzó niveles de pH superiores con respecto al Venturi, con una mediana superior de 7,7 und y de 7,3 und para Cascadas y Venturi respectivamente; se observó un dato atípico para el aireador de cascadas pero inclusive ese valor es superior a todas las observaciones que se tienen sobre el Venturi.

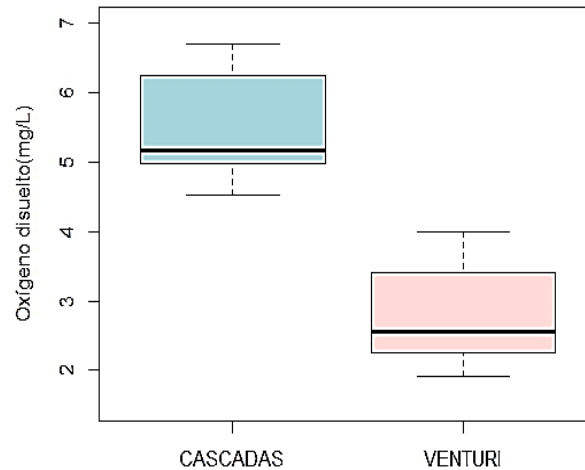


Figura 21. Diagrama de cajas del OD en aireador de Cascadas y Venturi

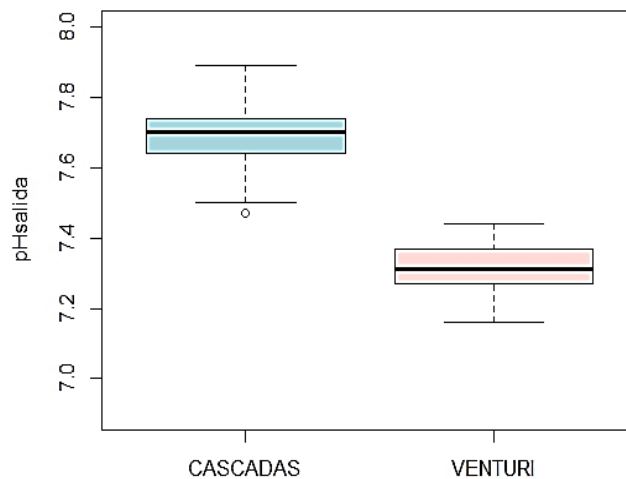


Figura 22. Diagrama de cajas para el pH en aireador de Cascadas y Venturi

Correlación entre Temperatura y OD para las dos tecnologías de aireación

En la Figura 23 se observa una relación lineal negativa entre la temperatura y el OD para el aireador Venturi de $-0,564$, evidenciando la relación inversa entre estas variables, es decir que a mayor temperatura la concentración de OD lograda disminuye.

En la Figura 24 se observa una relación lineal negativa entre la temperatura y el OD para el aireador de Cascadas de $-0,659$, es decir que evidencia una mayor relación inversa entre estas variables a la correlación del aireador Venturi.

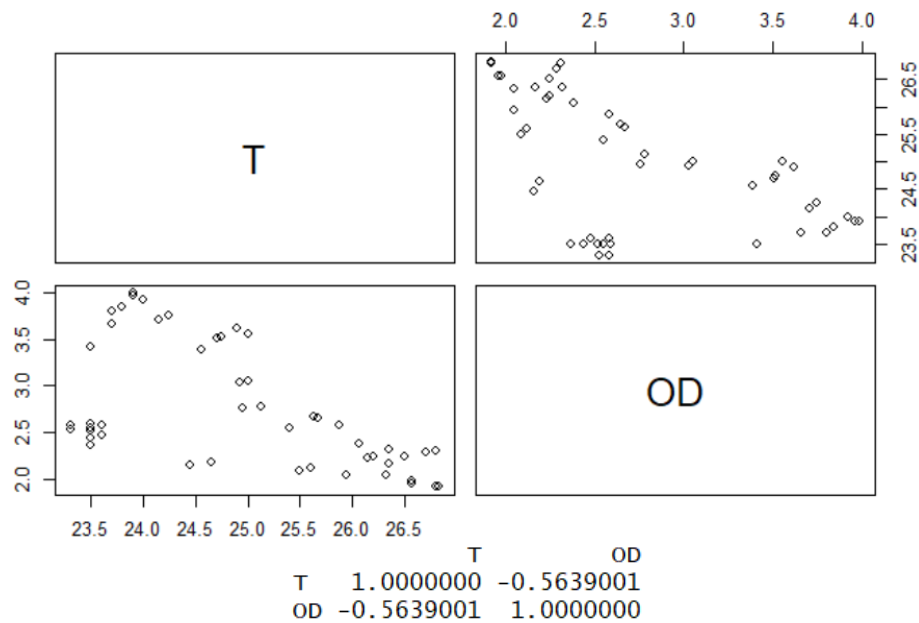


Figura 23. Gráfica de dispersión para temperatura y OD en aireador Venturi

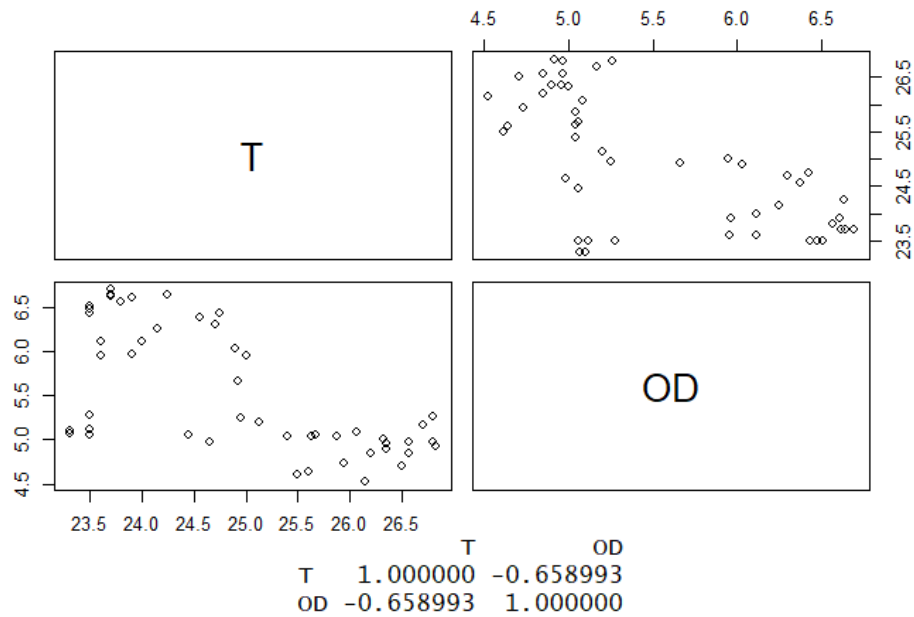


Figura 24. Grafica de dispersión y matriz de correlación para T° y OD en aireador Cascadas

Estos resultados comprueban la relación inversa que existe entre la temperatura y la concentración de OD para las dos tecnologías de aireación.

Análisis de la Varianza

Se planteó un modelo para cada caudal, es decir tres modelos en total, donde se establece como variable de respuesta el OD de salida de los aireadores y se tiene como variables regresoras o independientes la temperatura, el pH de salida y el tipo de aireador.

Anova para el caudal 0,8 L/s

En la Tabla 14, se presentan los datos del ANOVA para el caudal de 0,8 L/s, se observa que todas las variables resultaron significativas en el modelo ya que el valor p es menor que el nivel de significancia ($p < 0,05$). El valor-p se utiliza en la estadística para probar las hipótesis planteadas, el valor de 0,05 corresponde al nivel de significancia, para valores menores a 0,05 se dice que una variable es significativa. La variable que resultó menos significativa en el modelo de diseño fue el pH de salida obteniendo un resultado de p más cercano a 0,05

Para los aireadores se obtuvo la mayor influencia sobre la variable de respuesta que es el OD, es decir existen diferencias significativas ($p = 2,2 \times 10^{-16} < 0,05$) entre los sistemas Venturi y de Cascadas. El aireador de Cascadas presentó resultados de eficiencia de transferencia de OD más favorables con respecto al Venturi.

Tabla 14. Análisis de Varianza para caudal de 0,8 L/s

Response: ODSALIDA

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Temperatura	1	15.398	15.398	54.5705	6.031e-11 ***
Aireadores	1	189.024	189.024	669.8876	< 2.2e-16 ***
pHsalida	1	1.725	1.725	6.1144	0.01521 *
Residuals	94	26.524	0.282		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

En la Tabla 15 se presenta el resumen del ajuste de la ANOVA, donde se obtuvo un R^2 ajustado de 0,882, el cual mide el porcentaje de variación de la variable dependiente (OD salida) que puede explicarse por el modelo, evidenciando que en un 88,2% las variables explicativas (temperatura, tipo de aireadores y pH salida) se ajustaron bien a la variable OD, es decir, estas variables explican la variación del OD en un 88,2%.

Tabla 15. Resumen del ANOVA para caudal de 0,8 L/s

lm(formula = ODSALIDA ~ Temperatura + Aireadores + pHsalida)

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-1.04117	-0.47295	0.00817	0.51556	0.93421

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	1.86933	5.15187	0.363	0.7175
Temperatura	-0.39921	0.05026	-7.943	4.21e-12 ***
AireadoresVENTURI	-2.10855	0.29112	-7.243	1.20e-10 ***
pHsalida	1.77271	0.71691	2.473	0.0152 *

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.5312 on 94 degrees of freedom
Multiple R-squared: 0.886, Adjusted R-squared: 0.8824
F-statistic: 243.5 on 3 and 94 DF, p-value: < 2.2e-16

En la Figura 25 se observa una mayor concentración de OD lograda para el aireador de Cascadas sobre el aireador Venturi con respecto al factor temperatura. El aireador de Cascadas obtuvo una concentración promedio de 5,5 mg/L y un pH oscilando entre 7,5 y 7,7 und, mientras que el aireador Venturi obtuvo una concentración de 2,75 mg/L y un pH entre 7,2 y 7,3 und.

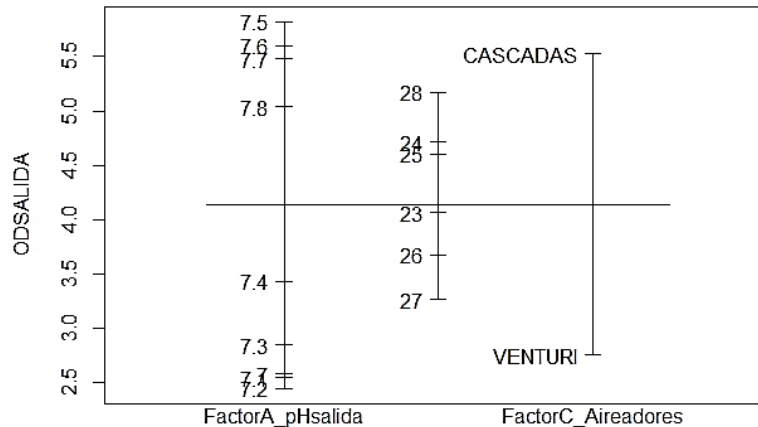


Figura 25. Grafica de efectos principales para Anova del caudal de 0,8 L/s

Obtenido el valor de las concentraciones finales de OD en ambos aireadores y la concentración inicial de OD de 0,66 mg/L, el coeficiente de eficiencia obtenido para el aireador de cascadas fue de 0,728 (72,8%), valor superior al coeficiente teórico (0,472) y para el aireador Venturi fue de 0,314 (31,4%), valor inferior al teórico (0,475).

Anova para el caudal de 0,6 L/s

En la Tabla 16 se presenta el ANOVA para el caudal de 0,6 L/s, evidenciando que el tipo de aireadores y la temperatura resultaron significativos o influyentes sobre la variable de respuesta OD y existen diferencias significativas entre los dos tipos de aireadores ya que el valor-p es menor que el nivel de significancia de 0,05. Sin embargo el pH no resultó significativo sobre la variable OD $0,466 > 0,05$, confirmando el planteamiento realizado en la discusión de la Figura 18.

Tabla 16. Análisis de Varianza para caudal de 0,6 L/s

Response: ODSALIDA						
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
Temperatura	1	2.109	2.109	138.2225	5.885e-11	***
Aireadores	1	38.115	38.115	2498.3948	< 2.2e-16	***
pHsalida	1	0.008	0.008	0.5506	0.4659	
Residuals	22	0.336	0.015			

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1						

En la Tabla 17 se observa que este modelo resultó ser más satisfactorio de acuerdo a la bondad de ajuste del diseño, ya que se obtuvo un R^2 ajustado de 0,964 estableciendo así que las variables regresoras o independientes explican en un 96,4% la variación de OD, dando un R^2 como una buena medida de desempeño.

En la Figura 26 se determina que el aireador de Cascadas resultó ser más eficiente sobre el aireador Venturi respecto al factor temperatura, obteniendo una concentración de 5,5 mg/L en un rango de temperatura entre 25 y 27 °C mientras que el aireador tipo Venturi obtuvo una concentración de 3,1 mg/L en un rango de temperatura entre 24 y 26 °C.

Tabla 17. Resumen del ajuste del ANOVA para caudal de 0,6 L/s

`lm(formula = `OD salida (mg/L)` ~ `T°` + AIREADOR + `pH salida`)`

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-0.40654	-0.18392	-0.00857	0.09797	0.52599

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	38.2226	10.4073	3.673	0.001335 **
`T°`	-0.4499	0.1022	-4.404	0.000225 ***
AIREADORVENTURI	-3.6858	0.5260	-7.007	4.95e-07 ***
`pH salida`	-2.8247	1.2088	-2.337	0.028964 *

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.2417 on 22 degrees of freedom
Multiple R-squared: 0.9683, Adjusted R-squared: 0.964
F-statistic: 224.2 on 3 and 22 DF, p-value: < 2.2e-16

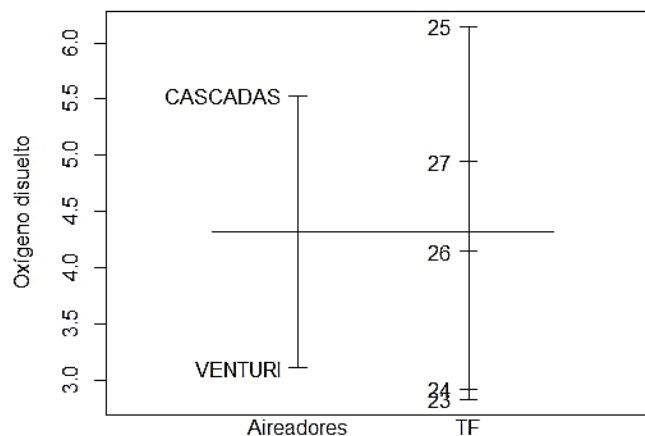


Figura 26. Grafica de efectos principales para Anova del caudal de 0,6 L/s

Anova para el caudal de 1,0 L/s

En la Tabla 18 se evidenció resultados diferentes respecto a los dos modelos anteriores, la temperatura y el pH de salida no resultaron significativas (valor-p mayor que 0,05); el tipo de aireador si fue significativo respecto a la variable OD, resaltando diferencias entre Venturi y Cascadas. Este resultado comprueba lo planteado en las curvas de la Figura 19 y Figura 20, donde no se evidenció una relación entre el OD y la temperatura como en los otros dos caudales, ni una relación entre los valores de pH y de OD.

Tabla 18. Análisis de Varianza para caudal de 1,0 L/s

Response: ODSALIDA

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Temperatura	1	0.033	0.033	0.308	0.5833
Aireadores	1	54.497	54.497	512.618	<2e-16 ***
pHsalida	1	0.079	0.079	0.744	0.3957
Residuals	28	2.977	0.106		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

En la Tabla 19 se observa que el R^2 ajustado resultó ser de 0,941, es decir las variables independientes del modelo explican en un 94,1% la variación en la respuesta de OD. Sin embargo, este valor no es

representativo ya que hay variables que no son significativas y no es una buena medida para evaluar la bondad de ajuste del modelo.

Tabla 19. Resumen del ajuste de la ANOVA para caudal de 1,0 L/s
 $\text{lm}(\text{formula} = \text{'OD salida (mg/L)'} \sim \text{'T°'} + \text{AIREADOR} + \text{'pH salida'})$

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-0.4551	-0.2374	-0.1302	0.2478	0.7739

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	-1.49565	12.48372	-0.120	0.905
T°	0.09056	0.21150	0.428	0.672
AIREADORVENTURI	-2.36331	0.50230	-4.705	6.21e-05 ***
pH salida	0.51935	1.02844	0.505	0.618

 Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.3306 on 28 degrees of freedom
 Multiple R-squared: 0.9469, Adjusted R-squared: 0.9412
 F-statistic: 166.3 on 3 and 28 DF, p-value: < 2.2e-16

En la Figura 27 se observa que el aireador de Cascadas alcanzó una concentración de OD de 5,5 mg/L y el aireador Venturi una concentración de 2,7 mg/L, además se observa una menor influencia de la temperatura en los resultados, corroborando el valor de significancia reportado por el modelo.

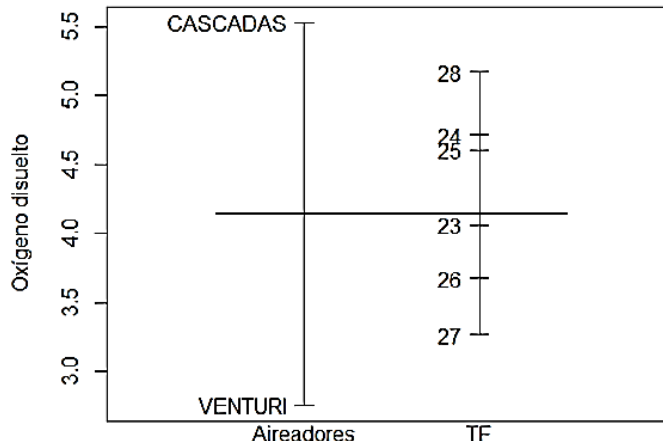


Figura 27. Grafica de efectos principales para Anova del caudal de 1,0 L/s

7.3. Efecto de los parámetros de diseño sobre la transferencia de oxígeno.

Aireador de Cascadas

La velocidad de caída entre bandejas influyó en la absorción de oxígeno cuando el aire entró en contacto con la superficie del agua en la bandeja, esto ocurre debido a la inmersión del flujo en la mayor parte del líquido, donde se dispersa bajo la forma de burbujas causando la entrada de significativas cantidades de aire a ser absorbido. Por lo tanto, la velocidad de caída es uno de los parámetros determinantes de la transferencia del oxígeno en este mecanismo de transferencia, la cual está asociada a la altura de la caída (Oh et al., 2014).

La altura de caída recomendada por (de Moel et al., 2006) es de 1,0 m y las alturas de caída del aireador diseñado fueron 1,10 m, 0,70 m y 0,6 m. Los valores de velocidad (4,65 – 3,71 y 3,43 m/s) para cada etapa en este diseño se encuentran en el rango de valores recomendados por (de Moel et al., 2006) (3,0 a 4,5 m/s), excepto para la primera etapa, donde la velocidad fue superior dada su mayor altura de caída (1,10 m). El tiempo total de caída de 1,20 s se encuentra dentro del rango de tiempo recomendado por (Montgomery, 1985) (0,5 – 1,2) s.

Uno de los parámetros que pudo haber influido en la concentración final de OD, fueron los múltiples vertederos por bandejas. Al tener una configuración de varios vertederos en vez de uno solo, la subdivisión del flujo en varios chorros aumenta el área de contacto aire-agua en la caída, que es donde el agua se expone al aire, lo que permite una mayor transferencia de oxígeno, concordando con lo planteado por (Von Sperling, 2005).

Aireador Venturi

En el aireador Venturi, la presión efectiva o manométrica en el punto de absorción de aire es una variable significativa, ya que al aumentar la presión de vacío hay mayor admisión de aire en la abertura de la tubería, es decir, al ser la presión efectiva negativa, la presión absoluta es menor a la atmosférica, lo que permite la entrada o aspiración de aire en la tubería

El caudal de agua es una variable que afecta la presión en el punto de aspiración del aireador, ya que al aumentar o disminuir, aumenta o disminuye la velocidad respectivamente y por consiguiente afecta las pérdidas por fricción y por accesorios en el sistema.

El diámetro de abertura en la tubería podría influir en la aspiración de aire, si se aumenta el diámetro el flujo de aire será mayor y tendrá mayor área de contacto el aire con el agua dentro del conducto. Además, la medición del caudal de aire con un flujómetro permitiría tener un mayor control sobre la relación aire agua ya que se podría cuantificar el caudal de ingreso de aire a la tubería y poder relacionar la presión de vacío con esta variable.

Se podría evaluar la transferencia de oxígeno mediante la instalación de un instrumento dentro de la tubería que aumente la turbulencia y por lo tanto el tiempo de contacto aire-agua y observar si aumenta la concentración de OD.

8. CONCLUSIONES

- Los resultados obtenidos muestran una mayor eficiencia de transferencia de OD para el aireador de Cascadas respecto al aireador Venturi. Para el caudal de diseño de 0,8 l/s, el aireador de cascadas obtuvo una concentración de 5,5 mg/L, logrando superar el valor de referencia recomendado de 4 mg/L, mientras que, el aireador Venturi obtuvo una concentración de 275 mg/L.
- El coeficiente de eficiencia que indica la diferencia entre la concentración de OD lograda en el estudio ($C - C_o$) dividida la máxima concentración que se puede obtener ($C_s - C_o$) dio un resultado para el aireador de cascadas de 0,728 (72,8%), valor superior al coeficiente de eficiencia teórico (0,472) y para el aireador Venturi fue de 0,314 (31,4%), valor inferior al teórico (0,475). Lo que demostró que el aireador de cascadas superó las expectativas en términos de transferencia de oxígeno al agua subterránea.
- Se encontró una correlación inversa entre la temperatura y el OD para ambos aireadores. Para el aireador Venturi fue de -0,564 y para el aireador de Cascadas fue de -0,659, es decir que al aumentar la temperatura el OD tiende a disminuir.
- Además, el análisis estadístico demostró una significancia (vapor- $p < 0,05$) de la temperatura sobre el OD para el caudal de 0,8 y 1,0 L/s, es decir que existen diferencias significativas entre la temperatura y el OD demostrando su influencia. Esta significancia no se observó para el caudal de 0,6 L/s. El pH del agua tuvo influencia en la variable OD para el caudal de diseño (0,8 L/s) ($p < 0,05$), es decir, a mayores concentraciones de OD el valor de pH tiende a incrementar. Sin embargo, esta significancia entre la variable pH y el OD no se evidenció para los caudales de 0,6 y 1,0 l/s.

9. RECOMENDACIONES

- Para establecer la relación que existe entre la altura de caída frente a la concentración de OD lograda por cada etapa en el aireador de Cascadas es necesario medir el OD en cada masa de agua de cada bandeja. Esto permitiría poder lograr posibles mejoras al diseño, encontrando la altura más eficiente y evitar un mayor requerimiento de presión del sistema de bombeo del pozo de agua subterránea.
- Para conocer la relación entre el caudal de agua y el paso de aire en el Venturi, es importante medir el caudal de aire aspirado en la contracción y así compararlo con el teórico calculado.
- En futuros trabajos es necesario realizar pruebas con una mayor presión de vacío para el Venturi y verificar si es necesario el aumento de la mezcla aire-agua dentro de la tubería frente a su efecto en la concentración de OD final.
- A futuro también es conveniente evaluar la combinación de las tecnologías de aireación evaluadas en términos del incremento en la transferencia de oxígeno.

BIBLIOGRAFÍA

- American Public Health Association (APHA). (2012). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22nd Edition*. (E. Rice, R. Baird, A. Eaton, & L. Clesceri, Eds.) (22nd ed.). Washington DC, United States of America: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.
- American Water Works Association (AWWA). (2002). *Calidad y Tratamiento del Agua: Manual de Suministros de Agua Comunitaria*. (R. Letterman, Ed.) (5th ed.). Madrid: McGraw-Hill.
- American Water Works Association. (2010). *Water Treatment, Principles and practices of water supply operations series*. (M. Valentine, Ed.) (4th ed.). Denver: American Water Works Association.
- Baquero, G. (2015). *Modelo para la corrección del error asociado a las medidas de oxígeno disuelto con sensores optimos durante la determinación del KLa en agua limpia*. Pontificia Universidad Javeriana, Bogota DC, Colombia.
- Bracho, N., Chacón, Y., Hernandez, F., Vargas, L., & Santiago, D. (2013). Evaluación a escala piloto de la remoción de color, hierro, aceite y grasas en aguas subterráneas. *Revista Técnica de Ingeniería*, Vol. 36(N° 1), 53–60.
- Calderón, R., Forero, S., & Suarez, A. (2012). Implementación de un diseño piloto de aireación para aguas, potencializado con microorganismos eficientes. *Revista Científica: Sección Ciencia E Ingeniería*, (0124 2253), 14.
- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). (2005). *Guía para el mejoramiento de la calidad del agua a nivel casero*. Lima.
- Chang, R. (2007). *Química* (9th ed.). México: McGraw-Hill Interamericana.
- Chavarro, D. (2014). *Diseño de una planta de tratamiento de agua potable de 2 L/s para una población de 750 habitantes*. Universidad Militar Nueva Granada, Bogota DC, Colombia.
- Contraloría General de Santiago de Cali. (2016). *Informe anual sobre el estado de los recursos naturales y del ambiente municipio Santiago de Cali - Vigencia 2015*. Cali.
- Crittenden, J., Truseell, R., Hand, D., Howe, K., & Tchobanoglous, G. (2012). Air Stripping and Aeration. In *MWH's Water Treatment: Principles and Design* (3rd ed., pp. 1033–1115). New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781118131473.ch14>
- CVC. (2009). *Plan de manejo para la protección de las aguas subterráneas en el departamento del Valle del Cauca*. Bogota DC.
- DAGMA. (2015). *Informe de calidad y niveles de la red de piezómetros municipio de Santiago de Cali*. Cali.
- de Moel, P., Verberk, J., & Van Dijk, J. (2006). *Drinking Water Principles and Practices*. (T. Kwang Wei,

- Ed.). Delf, Holland: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. Delf University Technology.
- de Vargas, L. (2004). *Tratamiento de agua para consumo humano Plantas de filtración rápida Manual I: Teoría Tomo I*. Lima: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS/OPS).
- EMCALI EICE ESP. (2001). *Manual de operación. Planta de tratamiento de aguas residuales de Cañaveralejo PTAR-C*. Cali.
- EMCALI EICE ESP. (2015). Norma Técnica de Acueducto y Alcantarillado NDI-SE-AA-046 V-2. Lineamientos para la elaboración y presentación de diseños hidrosanitarios de redes internas. Cali.
- García, J. (2008). *Comparación de aireación en bandejas y en torre compacta para tratamiento en flujo confinado de hierro y manganeso en aguas subterráneas: caso corregimiento El Hormiguero*. Universidad del Valle, Cali.
- Guevara, M. (1986). *Flujo a Presión*. Popayan, Colombia: Universidad del Cauca.
- Hand, D., Hokanson, D., & Crittenden, J. (2002). Air Stripping and Aeration. In R. Letterman (Ed.), *Water Quality and Treatment: A Handbook of Community Water Supplies* (5th ed., pp. 225–296). New York: McGraw-Hill.
- ICONTEC. (2012). *NTC 3651: Calidad del Agua. Determinación del pH*. Bogota DC, Colombia.
- ICONTEC. (2013). *NTC 4705: Calidad del Agua. Determinación del Oxígeno Disuelto (OD)*. Bogota DC.
- Kavanaugh, M., & Truseell, R. (1980). Design of aeration towers to strip volatile contaminants from drinking water. *Journal (American Water Works Association)*, Vol. 72(N° 12), 684–692. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/41270504>
- Loaiza, A. (2009). *Remoción de hierro y manganeso en aguas subterráneas mediante doble filtración con flujo a presión. Caso El Hormiguero - Cali*. Universidad del Valle, Cali.
- Maldonado, H. (2015). *Diseño de Planta de tratamiento de Agua Potable para el sitio el Recuerdo por el método de Aireación y Filtración*. Universidad Técnica de Machala, Machala.
- Marbello, R. (n.d.). Vertederos y calibración de vertederos de medida. In *Manual de prácticas de laboratorio de hidráulica* (pp. 5–47). Medellín: Universidad Nacional Sede Medellín.
- Marín, J. (2015). *Tratamiento de agua de lavado con hierro y manganeso, procedentes de plantas de potabilización de agua subterránea*. Universidad del Valle, Cali.
- Marín, R. (2003). *Fisicoquímica y Microbiología de los Medios Acuáticos. Tratamiento y control de calidad de aguas*. Madrid: Ediciones Días de Santos, S.A.
- Marquez, J. (1991). *Principios de secado de granos psicometría higroscopia* (Tecnología). Santiago,

- Chile. Retrieved from <http://www.fao.org/docrep/X5057S/x5057S00.htm#Contents>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). (2014a). *Guía Metodológica para la Formulación de Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos*. Bogota DC.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). (2014b). *Programa Nacional de Aguas Subterráneas*. Bogota DC.
- Ministerio de la Protección Social, & Ministerio de Vivienda y Desarrollo Territorial (MPS & MVDT). (2007). *Resolución 2115 de 2007*. Bogota DC, Colombia.
- Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio (MVCT). (2010). *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - Título C. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo territorial*. Bogota DC, Colombia.
- Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio (MVCT). (2017). *Resolución 0330 de 2017. Reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico - RAS*. Bogota DC, Colombia.
- Montgomery, J. (1985). *Water Treatment Principles and Design*. United States of America: John Wiley & Sons, Inc.
- Munson, B., Okiishi, T., Huebsch, W., & Rothmayer, A. (2013). *Fundamentals of Fluid Mechanics* (7° Ed). Iowa, United States of America: John Wiley & Sons, Inc.
- Oh, C., Yu, C., & Cheong, Y. (2014). Efficiency assessment of cascade aerator in a passive treatment system for Fe (II) oxidation in ferruginous mine drainage of net alkaline. *Environ Earth Sci*. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3791-7>
- PAVCO. (2014). *Manual Técnico Tubosistemas Presión PVC*.
- Pérez, R. (2010). *Instalaciones hidrosanitarias y de gas para edificaciones* (6° Ed). Bogota DC, Colombia: Ecoe Ediciones.
- Pöpel, H. (1995). *Aeration and Gas Transfer*. Delf, Holland: Delf University of Technology.
- Romero, J. (2006). *Purificación del agua* (3° Edición). Bogota DC, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Romero, J. (2009). *Calidad del agua* (3ra Edición). Bogota DC: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Ruiz, C. (2013). *Diseño de un sistema de tratamiento de agua potable para la parroquia San Isidro del Cantón Guano*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- Saldarriaga, J., Navarrete, M., & Galeano, L. (n.d.). Aireación de flujos de alta velocidad, una metodología alterna para el diseño de aireadores. *Revista de Ingeniería Uniandes*.
- Sears, F., & Zemansky, M. (2004). *Física Universitaria*. (G. Trujano, Ed.) (11° Ed, Vol. 1). México, México: Pearson Educación.

- Torrez, P., & Rodriguez, J. (2014). *Guía de laboratorio de procesos ambientales. Practica 7 Transferencia de Oxígeno*. Universidad del Valle, Cali.
- Von Sperling, M. (2005). *Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions*. IWA Publishing. London, United Kingdom: IWA Publishing. <https://doi.org/10.5860/CHOICE.45-2633>
- Weber, W. (1972). *Physicochemical Processes for Water Quality Control*. Michigan: John Wiley & Sons, Inc.
- White, F. (1994). *Fluid Mechanics* (3°). Boston, United States of America: McGraw-Hill.

ANEXOS

Anexo 1. Coeficiente de pérdidas de energía locales k en aireador Venturi

Tabla 1A. Valores de K y perdidas locales o por accesorios del aireador Venturi

Accesorio	Cantidad	K
Codo 90° Roscado 3/4"	1	1,50
Valv. Compuerta 3/4"	1	7,40
Tee paso directo 3/4"	1	0,20
Tee salida lateral 3/4"	1	1,00
Valv. Bola 3/4"	1	0,05
Unión extremos lisos 3/4"	1	0,04
Unión extremos roscados 3/4"	4	0,08
Codo 90° extremo liso 3/4"	7	0,30
Reducción brusca 3/4" - 1/2"	1	0,17
Codo 90° extremo liso 1/2"	13	0,30
Tee paso directo 1/2"	1	0,20

Valores de K adaptados de (Guevara, 1986) y (Munson et al., 2013)

El coeficiente K para la reducción brusca se calculo con la Ec. 1A (Munson et al., 2013).

$$K = 0,42 * \left(1 - \frac{A_2}{A_1}\right) \quad \text{Ec. 1A}$$

Donde:

A: area transversal de una tubería

El valor del K en la valvula tipo cortina, tuvo en cuenta el efecto de la apertura parcial presentado en la Figura 1A, la cual cierra completamente a 3,75 giros y la cantidad de giros para obtener el caudal de diseño fue de 2,25 giros, lo que equivale a una apertura parcial del 40% de la valvula.

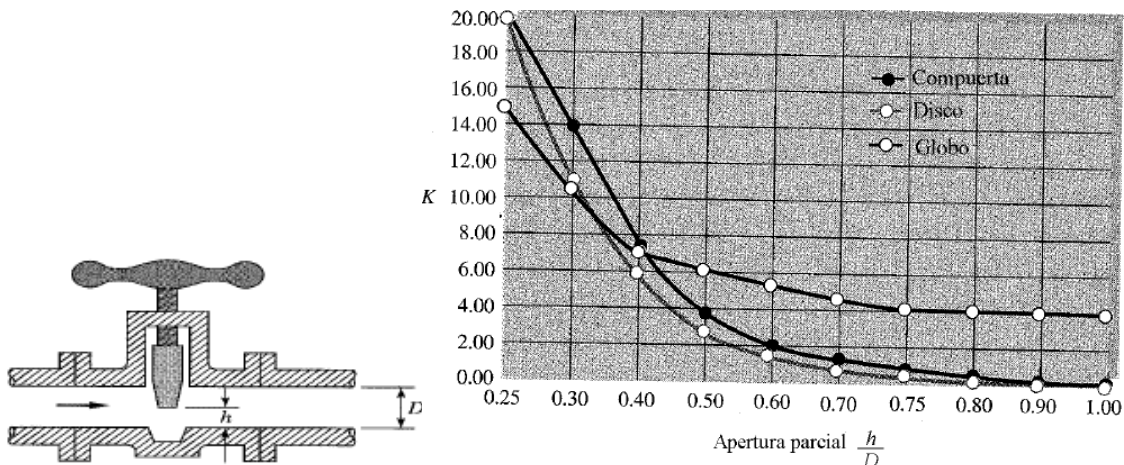


Figura 1A. Efecto de la apertura parcial de una valvula cortina en el valor de K

Fuente: (White, 1994)

Anexo 2. Perdidas de presión en aireador Venturi para caudal de 0,6 y 1,0 L/s

Tabla 2A. Velocidad y pérdidas de energía primarias en aireador Venturi con caudal de 0,6 L/s

Caudal	L/s	m3/s	Presión	PSI	mca	PERDIDAS PRIMARIAS			
	0,60	6E-04	en P1	9,00	6,33				
Diámetro Nominal		Diámetro interior		Área	Velocidad	Energía Cinética	Perdidas unitarias	Longitud tubería	Hf _p por tramo
in	mm	mm	m	m ²	m/s	mca	m/m	m	mca
3/4	26	23,63	0,0236	0,00044	1,368	0,095	0,075	5,00	0,37
1/2	21	18,18	0,0182	0,00026	2,311	0,272	0,260	7,20	1,87
Total								12,20	2,24

Tabla 3A. Valores de K y perdidas locales del aireador Venturi con caudal de 0,6 L/s

Accesorio	Cantidad	K	h _{fs} (mca)
Codo 90° Roscado 3/4"	1	1,50	0,14
Valv. Compuerta 3/4"	1	12,00	1,14
Tee paso directo 3/4"	1	0,20	0,02
Tee salida lateral 3/4"	1	1,00	0,10
Valv. Bola 3/4"	1	0,05	0,00
Unión extremos lisos 3/4"	1	0,04	0,00
Unión extremos roscados 3/4"	4	0,08	0,03
Codo 90° extremo liso 3/4"	7	0,30	0,20
Reducción brusca 3/4" - 1/2"	1	0,17	0,05
Codo 90° extremo liso 1/2"	13	0,30	1,06
Tee paso directo 1/2"	1	0,20	0,05
Total hfs			2,81

Tabla 4A. Velocidad y pérdidas de energía primarias en aireador Venturi con caudal de 1,0 L/s

Caudal	L/s	m3/s	Presión	PSI	mca	PERDIDAS PRIMARIAS			
	1,00	0,001	en P1	9,00	6,33				
Diámetro Nominal		Diámetro interior		Área	Velocidad	Energía Cinética	Perdidas unitarias	Longitud tubería	Hf _p por tramo
in	mm	mm	m	m ²	m/s	mca	m/m	m	mca
3/4	26	23,63	0,0236	0,00044	2,280	0,265	0,183	5,00	0,91
1/2	21	18,18	0,0182	0,00026	3,852	0,756	0,635	7,20	4,57
Total								12,20	5,48

Tabla 5A. Valores de K y perdidas locales del aireador Venturi con caudal de 1,0 L/s

Accesorio	Cantidad	K	h _{fs} (mca)
Codo 90° Roscado 3/4"	1	1,50	0,40
Valv. Compuerta 3/4"	1	5,00	1,33
Tee paso directo 3/4"	1	0,20	0,05
Tee salida lateral 3/4"	1	1,00	0,27
Valv. Bola 3/4"	1	0,05	0,01
Unión extremos lisos 3/4"	1	0,04	0,01
Unión extremos roscados 3/4"	4	0,08	0,08
Codo 90° extremo liso 3/4"	7	0,30	0,56
Reducción brusca 3/4" - 1/2"	1	0,17	0,13

Accesorio	Cantidad	K	h_{fs} (mca)
Codo 90° extremo liso 1/2"	13	0,30	2,95
Tee paso directo 1/2"	1	0,20	0,15
Total hfs			5,94

Anexo 3. Curvas de OD, pH y temperatura de cada ensayo para caudal de 0,8 L/s

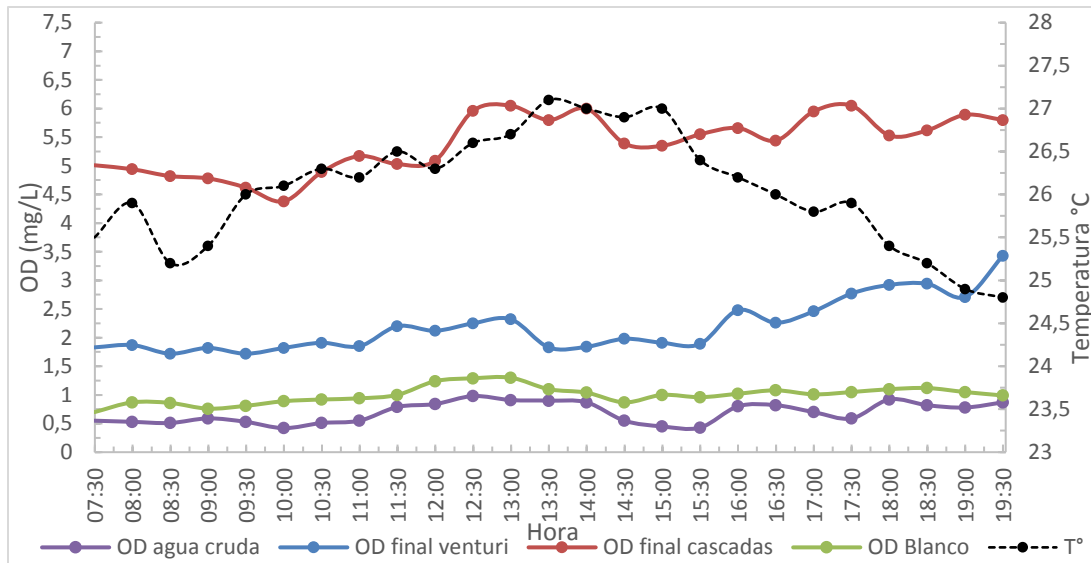


Figura 2A. Curva de OD para caudal 0,8 L/s (14-mayo-2018)

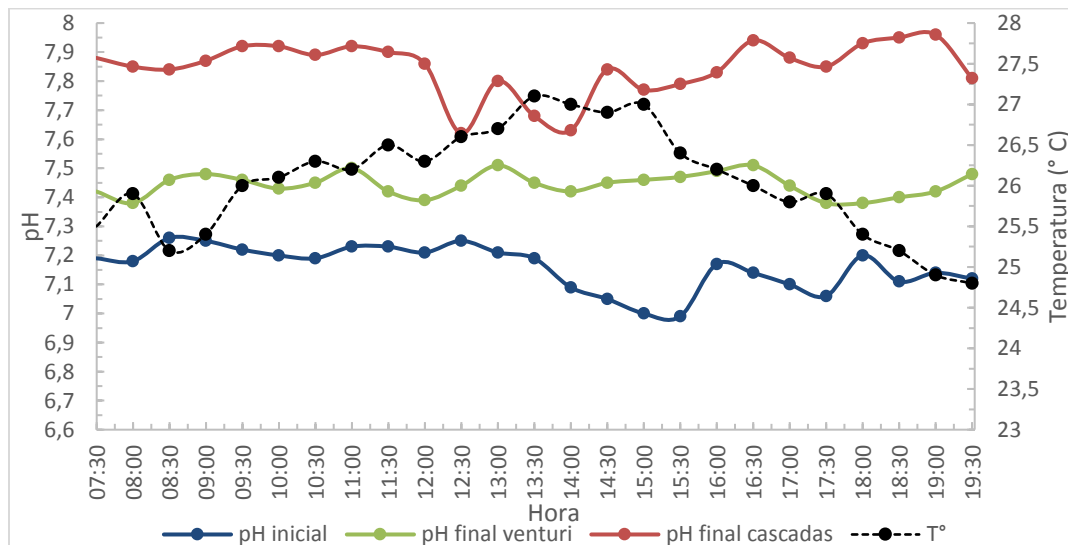


Figura 3A. pH y temperatura para caudal 0,8 L/s (14-mayo-2018)

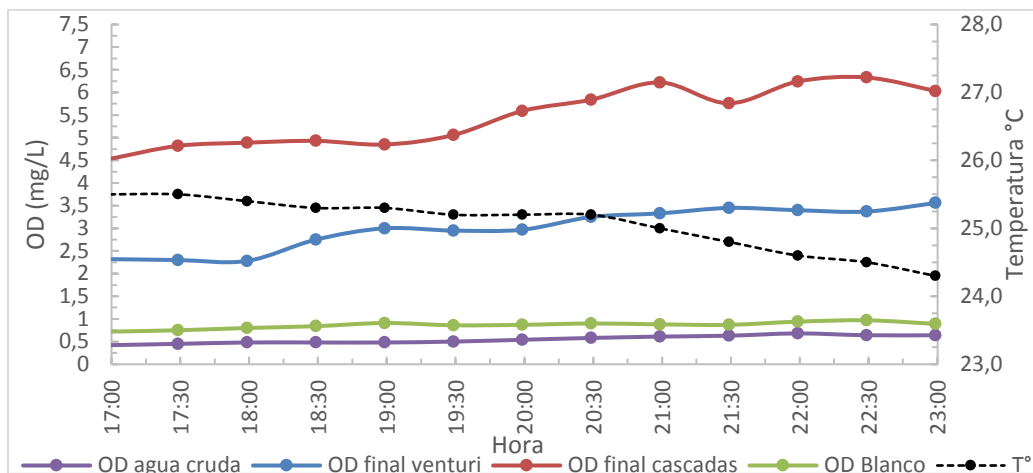


Figura 4A. Curva de OD para caudal 0,8 L/s (15-mayo-2018)

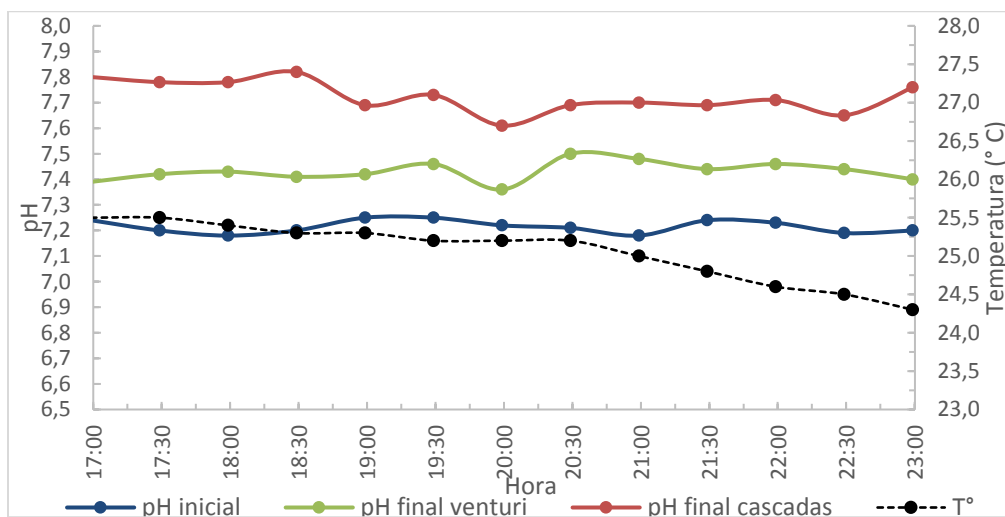


Figura 5A. pH y temperatura para caudal 0,8 L/s (15-mayo-2018)

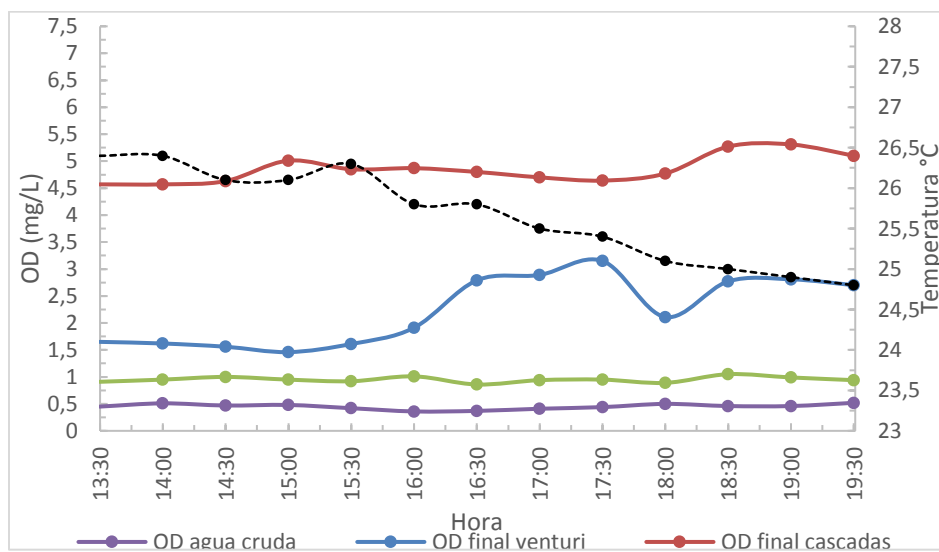


Figura 6A. Curva de OD para caudal 0,8 L/s (19-mayo-2018)

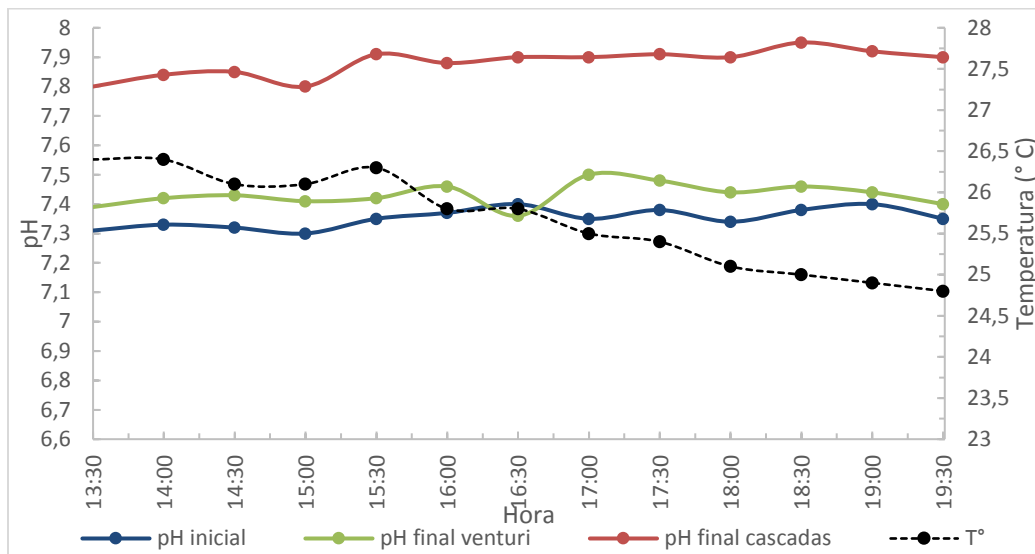


Figura 7A. pH y temperatura para caudal 0,8 L/s (19-mayo-2018)

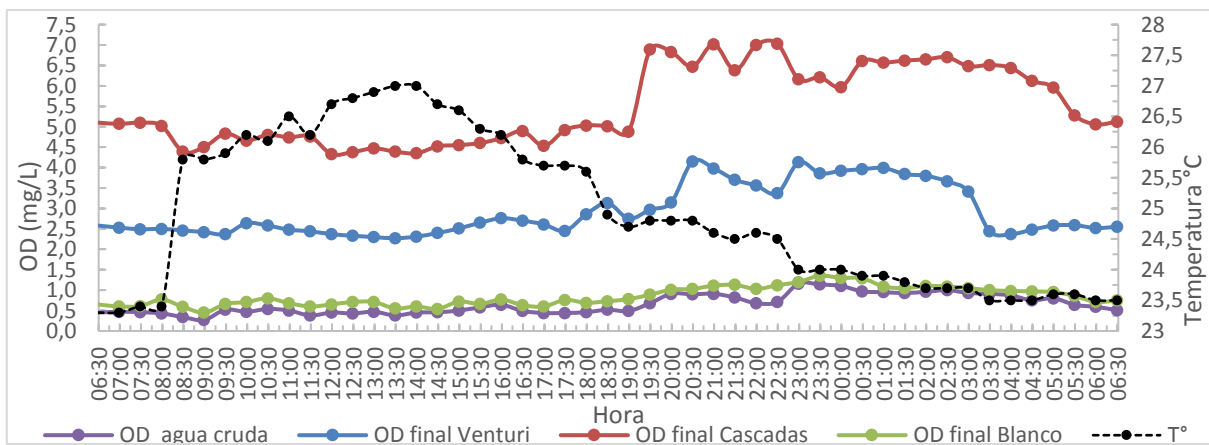


Figura 8A. Curva de OD para caudal 0,8 L/s (26-mayo-2018)

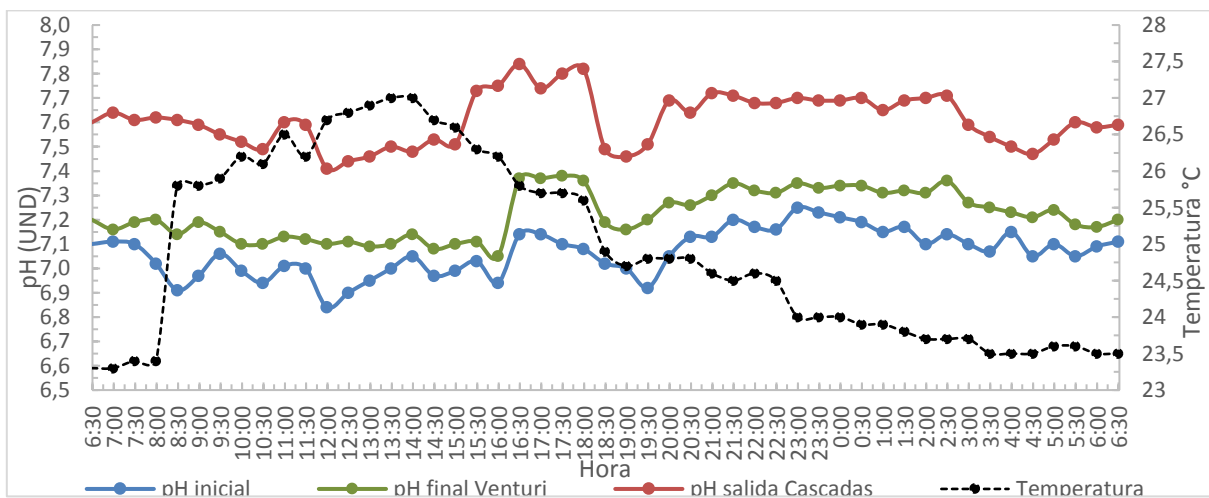


Figura 9A. pH y temperatura para caudal 0,8 L/s (26-mayo-2018)