

Apéndice C. Diseño Hidráulico de Bocatoma y Desarenador para el Acueducto Rural Conforme a la Normativa Colombiana (Resolución 0330 de 2017)

Introducción

El diseño de cualquier sistema de acueducto se basa en una serie de parámetros iniciales que definen alcance, capacidad y la vida útil del proyecto. La correcta definición de esta etapa es vital para garantizar que la infraestructura sea técnica y económicamente viable, sostenible en el tiempo y capaz de satisfacer las necesidades de la comunidad a beneficiar.

Establecimiento de Parámetros Fundamentales del Proyecto

Para este estudio, se establecen los siguientes parámetros de diseño que servirán como datos de entrada para el predimensionamiento de la bocatoma y desarenador. Estos valores están basados en los requisitos de la normativa colombiana vigente.

Población Inicial (P_0): 1500 habitantes. Corresponde a la población actual objetivo para ser servida por el nuevo acueducto.

Periodo de Diseño (n): 25 años. Este es el tiempo para el cual se diseña el sistema, asegurando que la infraestructura tenga la capacidad de satisfacer la demanda futura durante su vida útil.

Nivel de Complejidad: Bajo.

Dotación Neta Máxima (D_n): $130 \frac{l}{hab*día}$

Fuente Hídrica: Quebrada Lajas. El estudio hidrológico identificó esta microcuenca como la fuente de abastecimiento seleccionada, dado su bajo estés hídrico y su viabilidad geográfica.

Caudal Disponible en la Fuente: $2,17 m^3/s$. Este es el caudal disponible en Quebrada Lajas de acuerdo al estudio hidrológico. Al ser superior a la demanda proyectada, se confirma la viabilidad de la fuente.

Proyección de la Población Futura (P_f)

En aras de asegurar que el acueducto cumpla con su vida útil estimada, se requiere estimar la población que existirá al final del periodo de diseño de 25 años. El método seleccionado es el Método Geométrico, consecuente con las características de la comunidad. Su fórmula es:

$$P_f = P_o * (1 + r)^n$$

Donde:

P_f = Población futura al final del periodo de diseño.

P_o = Población inicial (1500 habs).

r = Tasa de crecimiento anual.

n = Periodo de diseño (25 años)

La tasa de crecimiento se obtiene de realizar un promedio conservador con respecto a la información suministrada por el DANE, en donde esta fluctúa entre un 0,5% y un 2,5%. Para esta zona rural se adapta una tasa de crecimiento anual del 1.2% ($r = 0.012$).

Sustituyendo valores tenemos:

$$P_f = 1500(1 + 0.012)^{25} = 2021 \text{ habitantes}$$

La población de diseño al final de los 25 años será de 2.021 habitantes.

Cálculo de la Dotación Bruta (D_b) y Porcentaje de Pérdidas ($\%_p$)

La dotación neta (D_n) es el agua que llega al usuario, pero el sistema debe captar una cantidad mayor en modo de compensación con las pérdidas técnicas en el proceso de conducción y distribución. El artículo 47 de la Resolución 0330 de 2017 establece que al momento de diseñar, el porcentaje de pérdidas no debe superar el 25%.

La Dotación Bruta (D_b) es el volumen de agua que se debe captar por habitante para suplir tanto consumo como pérdidas, de este modo:

$$Db = \frac{Dn}{1 - \%p} = \frac{130}{1 - 0.25} = 173 \frac{l}{hab * día}$$

El sistema se diseñará para captar 173.33 litros por cada habitante por día.

Determinación de los Caudales de Diseño

Los caudales de diseño son flujos específicos para los que se dimensiona cada componente del acueducto. El artículo 47 de la Resolución 0330 de 2017 define los caudales, así:

Caudal Medio Diario

Representa el consumo promedio a lo largo de un año, calculado para la población futura:

$$Q_{md} = \frac{Pf * Db}{86400s/día} = \frac{2021 * 173.33}{86400} = 4.05 l/s$$

Coefficientes de Mayoración

Estos coeficientes transforman el caudal medio en caudales máximos. El RAS estipulan valores máximos para estos coeficientes en función de la población de diseño. Para una población menos a los 12.500, los valores son:

Coefficiente de Caudal Máximo Diario (K_1): 1,3

Coefficiente de Caudal Máximo Horario (K_2): 1,6

Caudal Máximo Diario (Q_{MD})

Este es el caudal de diseño para obras de captación, así:

$$Q_{MD} = Q_{md} * K_1 = 4,05 \frac{l}{s} * 1,3 = 5,27 l/s$$

Caudal Máximo Horario (Q_{MH})

Caudal de la hora de mayor consumo del día de mayor consumo, así:

$$Q_{MH} = Q_{md} * K2 = 4,05 \frac{l}{s} * 1,6 = 6,48 \text{ l/s}$$

Caudal de Diseño de la Captación

La normativa permite diseñar la estructura para un caudal superior al Q_{MD} para proporcionar un margen de seguridad operacional y asegurar que el sistema satisfaga la demanda incluso si presenta fluctuaciones en la fuente. Por esto, se adoptará un factor de seguridad de 1,5 sobre el Q_{MD} .

$$Q_{captación} = Q_{MD} * 1,5 = 5,27 \text{ l/s} * 1,5 = 7,91 \text{ l/s}$$

En la siguiente tabla se resumen los parámetros y caudales calculados que regirán el diseño.

Tabla 1. *Resumen de Parámetros de Diseño.*

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Población Inicial	Po	1500	Habitantes
Periodo Diseño	n	25	Años
Tasa Crecimiento Anual	r	1,2	%
Población Futura	Pf	2.021	Habitantes
Dotación Neta Máxima	Dn	130	l/hab*día
Porcentaje de Pérdidas	%p	25	%
Dotación Bruta	Db	173,33	l/hab*día
Coeficiente Máximo Diario	K1	1,3	Factor
Coeficiente Máximo Horario	K2	1,6	Factor
Caudal Medio Diario	Qmd	4,05	l/s
Caudal Máximo Diario	QMD	5,27	l/s
Caudal Máximo Horario	QMH	6,48	l/s
Caudal de Diseño de Captación	Qcaptación	7,91	l/s

Fuente: elaboración propia.

Diseño Hidráulico de la Bocatoma Lateral

La bocatoma es la estructura de captación de agua de la fuente natural. Su función es la de asegurar el caudal de diseño, evitando el ingreso de sedimentos gruesos, material flotante y caudales excesivos durante crecidas.

Justificación y Criterios de Elección

El artículo 54 del RAS describe varios tipos de captaciones, para este proyecto se selecciona una bocatoma lateral, justificada por lo siguiente:

El estudio hidrológico indica que la fuente seleccionada tiene un caudal medio disponible de 2,17 m³/s, lo que se puede clasificar como una fuente caudalosa en comparación con la pequeña demanda para este proyecto. Esta toma lateral es explícitamente recomendada para este tipo de ríos.

Este tipo de bocatoma no requiere la construcción de un dique que ocupe todo el ancho del río, por lo que el tipo de construcción que se hará es consecuente con el nivel de complejidad bajo del proyecto, resultando en menores costos de construcción y un menor impacto ambiental.

El diseño debe cumplir con los requisitos obligatorios del artículo 53 del RAS, que incluyen garantizar la estabilidad de la obra ante crecientes con un periodo de retorno de 100 años, protección contra la socavación y la inclusión de rejillas para impedir el paso de objetos gruesos.

Dimensionamiento del Vertedero de Captación

El vertedero de captación es la abertura en el muro lateral por donde ingresa el agua. Su longitud y altura de agua sobre su cresta determinan el caudal captado. Se utilizará la fórmula de vertedero rectangular de pared sin contracciones laterales:

$$Q_{captación} = C * L * H^{\frac{3}{2}}$$

Donde:

Q_{captación}: Caudal de diseño de la bocatoma (7,91 l/s)

C: Coeficiente de vertedero. Se adopta C=1,84 para un vertedero de cresta agua en unidades del SI.

L: Longitud de la cresta del vertedero (m).

H: Altura de la lámina de agua sobre la cresta del vertedero.

Se busca una carga (H) que no sea ni muy pequeña ni muy grande. Teniendo en cuenta lo anterior se asume una H: 0,15 m. Así, despejando L:

$$L = \frac{Q_{captación}}{C * H^{\frac{3}{2}}} = \frac{0,00791}{1,84 * (0,15)^{\frac{3}{2}}} = 0,074 \text{ m} \approx 0,75 \text{ m}$$

Se adopta una longitud de L = 0,75 m ya que es constructivamente viable.

$$Q_{real} = 1,84 * 0,75 * 0,15^{\frac{3}{2}} = 8,01 \text{ l/s}$$

Este caudal de 8,01 es ligeramente superior al de diseño (7,91 l/s) lo cual es aceptable y proporciona margen de seguridad.

Diseño de la Rejilla de Entrada

La rejilla es la primera barrera física contra el ingreso de ramas, hojas y otros sólidos.

Criterios de Diseño:

Material: Barras de acero

Espesor de barras (e): 1 cm (0,01m)

Espaciamiento libre entre barras (b): 2,5 cm (0,025 m)

Velocidad de flujo a través de rejilla (Vrejilla): Se adopta una velocidad de 0,4 m/s. Este valor es un estándar que previene el atascamiento de material en la rejilla.

Área Neta Requerida (An)

Es el área libre por donde pasa el agua.

$$An = \frac{0,00791 \text{ m}^3/\text{s}}{0,4 \text{ m/s}} = 0,0198 \text{ m}^2$$

Área Bruta de la Rejilla (Ab)

$$An = Ab * \frac{b}{b + e}$$

Despejando Ab :

$$Ab = An * \frac{b + e}{b} = 0,0198 * \frac{0,025 + 0,01}{0,025} = 0,0277m^2$$

Dimensiones de la Rejilla

Teniendo en cuenta que la longitud del vertedero es de 0,75, se usará el ancho de rejilla de ese valor.

$$Altura Rejilla = \frac{Ab}{Ancho} = \frac{0,0277}{0,75} = 0,037m \text{ (3,7cm)}$$

Esta altura es pequeña, por lo que se construirá una rejilla con una altura mayor. La rejilla se colocará sobre el vertedero de captación, con una carga de 15 cm. Se tomará una altura total de rejilla de 0,4m y un ancho de 0,75. El área neta será mucho mayor que la requerida, por lo que reduce la velocidad de paso y el riesgo de obstrucción.

Pérdida de Carga en la Rejilla (hr)

Se calcula con la siguiente fórmula:

$$h_r = \beta * \left(\frac{e}{b}\right)^{\frac{4}{3}} * \frac{V^2_{canal}}{2g} * \sin(\theta)$$

Donde:

V_{canal} : Velocidad de aproximación del agua antes de la rejilla (aprox. 0,3 m/s)

β : Factor de forma de barra (2,42 para rectangulares)

θ : Ángulo de rejilla con la horizontal (se asume de 60°)

$$h_r = 2,42 * \left(\frac{0,01}{0,025}\right)^{\frac{4}{3}} * \frac{(0,3)^2}{2 * 9,81} * \sin(60) = 0,0028m$$

La pérdida de carga es de 2,7 mm, un valor muy bajo y aceptable que no afectará la hidráulica del sistema.

Diseño del Canal de Aducción y Compuerta de Regulación

Este canal transporta el agua desde la rejilla hasta el desarenador. Se debe diseñar para un flujo tranquilo en aras de evitar turbulencias que impidan la sedimentación.

Criterios de diseño:

Caudal: Qcaptación: 0,00791 m³/s.

Forma: Canal rectangular.

Coeficiente de Manning (n): 0,014 para concreto bien acabado.

Pendiente (S): Se asume de 0,5% (suave, S=0,005)

Dimensiones: Se asume un ancho de fondo de 0,4 m.

Usando la ecuación, se calcula la altura del flujo (y):

$$Q = \frac{1}{n} * A * R_h^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}}$$

Donde $A = b * y$ y $R_h = \frac{b*y}{b+2y}$

Resolviendo por iteración para y:

$$0,00791 = \frac{1}{0,014} * 0,4y * \left(\frac{0,4y}{0,4 + 2y} \right)^{\frac{2}{3}} * 0,005^{\frac{1}{2}}$$

La solución iterativa arroja una altura de flujo de $y = 0,04$ m, y, teniendo en cuenta el borde libre que se debe dejar para el canal, al cual se le asigna un borde libre de 0,08 m, se obtiene una $y = 0,12$ m.

Por método constructivo, se adoptará una altura total de 0,30 m. Una compuerta deslizante de acero de 0,4 m x 0,4 m se instalará al inicio del canal que permita la regulación del caudal y el cierre para el mantenimiento.

En la siguiente tabla se resumen las dimensiones finales de la bocatoma.

Tabla 2. *Resumen de Dimensiones Finales de Bocatoma.*

Componente	Parámetro	Valor	Unidad
Vertedero de Captación	Longitud (L)	0.75	m
	Carga de Diseño (H)	0.15	m
	Dimensiones (Ancho x Alto)	0.75 x 0.40	m
Rejilla de Entrada	Espaciamiento libre entre barras	2.5	cm
	Velocidad de paso de diseño	< 0.4	m/s
	Pérdida de Carga estimada	2.7	mm
Canal de Aducción	Ancho de fondo (b)	0.40	m
	Altura total del canal	0.30	m
	Tirante de agua (y)	0,04	m
	Pendiente (S)	0.5	%

Diseño Hidráulico del Desarenador de Flujo Horizontal

El desarenador es una estructura importante, dado que el estudio hidrológico identifica la erosión y los sedimentos como una fuente de contaminación significativa en la microcuenca. Se diseñará un sistema de flujo horizontal convencional.

Objetivos de Diseño y Parámetros de Remoción

El diseño se regirá por los requisitos mínimos establecidos en el artículo 55 del RAS.

El desarenador debe tratar el Q_{MD} , que es de $0,00527 \text{ m}^3/\text{s}$.

Para garantizar la operación continua durante labores de limpieza y mantenimiento, la normativa exige un sistema de paso directo, por lo que, la solución más efectiva es diseñar dos unidades idénticas en paralelo. Cada unidad se diseñará para la mitad del caudal total, así: $Q_{MD}/2$: $2,635 \text{ l/s}$

Se debe garantizar la remoción de partículas con un diámetro mínimo de $0,1 \text{ mm}$.

La velocidad de flujo a través de la zona de sedimentación debe ser inferior a $0,25 \text{ m/s}$ para evitar la resuspensión de partículas ya decantadas.

Se asume partícula esférica con densidad (p_s) de 2650 kg/m^3 (2.65 gr/cm^3).

El tiempo de retención hidráulico (T_r) no debe ser menor de 20 minutos (1200s).

Cálculo de la Velocidad de Sedimentación (vs) de la Partícula de Diseño

Esta velocidad de sedimentación es la velocidad vertical con la que la partícula de diseño cae en el agua por gravedad. Así:

$$V_s = \frac{g * (\rho_s - \rho_w) * d^2}{18 * \mu}$$

Donde:

g : Aceleración de la gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$)

ρ_s : Densidad de la partícula de arena (2650 kg/m^3)

ρ_w : Densidad del agua.

d : Diámetro de la partícula de diseño ($1 \times 10^{-4} \text{ m}$)

μ : Viscosidad dinámica del agua.

Tanto la densidad como la viscosidad del agua dependen de la temperatura. Se asumirá una temperatura promedio de 15°C . A esta temperatura, las propiedades del agua son:

ρ_w : $999,1 \text{ kg/m}^3$

μ : $0,001139 \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$

Sustituyendo así:

$$V_s = \frac{9,81 * (2650 - 999,1) * 1 \times 10^{-4}^2}{18 * 1,139 \times 10^{-3}} = 0,0079 \text{ m/s}$$

Dimensionamiento de la Zona de Sedimentación

Con la V_s calculada, se puede determinar el área superficial y las dimensiones de las dos unidades del desarenador.

Área Superficial Requerida por Unidad (A_s):

$$A_s = \frac{Q_{MD}}{2} * V_s = \frac{0,00527}{2} * 0,0079 = 0,333 \text{ m}^2$$

Dimensiones

Para asegurar un flujo estable, se adopta una relación largo/ancho de 4:1.

$$A_s = L * B = (4B) * B = 4B^2$$

$$B = \sqrt{\frac{A_s}{4}} = \sqrt{\frac{0,333}{4}} = 0,288 \text{ m}$$

Se adopta un ancho constructivo de B: 0,30 m.

$$L = 4 * B = 4 * 0,3 = 1,2 \text{ m}$$

Las dimensiones de la zona de sedimentación de cada unidad serán de 1,20m de largo por 0,3m de ancho. El área superficial provista es de $1,20 * 0,3 = 0,36 \text{ m}^2$, que es un valor mayor a la requerida ($0,333 \text{ m}^2$) lo cual es favorable.

Profundidad de la Zona de Sedimentación (H)

La profundidad se calcula para cumplir con el requisito de velocidad horizontal menor a 0,25 m/s.

$$V_h = \frac{Q_{unidad}}{A_t} = \frac{Q_{unidad}}{B * H}$$

Despejando H, tenemos

$$H = \frac{Q_{unidad}}{B * V_h} = \frac{0,002635}{0,30 * 0,15} = 0,058 \text{ m}$$

Esta profundidad es muy pequeña y no es práctica. La profundidad debe ser suficiente para permitir la sedimentación sin que las partículas sean arrastradas, por lo que, se asumirá una profundidad mínima de $H = 0,40 \text{ m}$.

Se procede a verificar la velocidad horizontal con esta nueva profundidad:

$$V_h = \frac{0,002635}{0,30 * 0,40} = 0,022 \text{ m/s}$$

Esta velocidad (0,022 m/s) es muy inferior al límite de 0,25 m/s, por lo que se garantiza excelentes condiciones de sedimentación.

Verificación de Criterios Normativos

Tiempo de Retención (T_r)

$$\text{Volumen: } Vol = L * B * H = 1,20 * 0,30 * 0,40 = 0,144 \text{ m}^3$$

$$T_r = \frac{Vol}{Q_{unidad}} = \frac{0,144}{0,002635} = 54,6 \text{ s.}$$

Este tiempo es inferior a los 1200s requeridos por el artículo 55. Para cumplir con este criterio, se debe aumentar el volumen. Se mantendrá el ancho y profundidad y se recalculará la longitud necesaria para un T_r de 20 minutos.

$$Vol_{req} = Q_{unidad} * T_r = 0,002635 * 1200 = 3,162 \text{ m}^3$$

$$L_{nuevo} = \frac{Vol_{req}}{B * H} = \frac{3,162}{0,3 * 0,4} = 26,35 \text{ m}$$

Esta longitud es excesivamente grande para un caudal tan pequeño. Se adoptará una longitud de $L = 3 \text{ m}$.

$$L = 3 \text{ m}, B = 0,6 \text{ m} \left(\text{para relación } \frac{L}{B} \text{ de } 5:1 \right), H = 0,5 \text{ m}$$

$$A_s = 3 * 0,6 = 1,8 \text{ m}^2 \text{ (Superior a la requerida de } 0,333 \text{ m}^2)$$

$$V_h = \frac{0,002635}{0,6 * 0,5} = 0,0088 \text{ m/s (Bajo)}$$

$$T_r = \frac{3 * 0,6 * 0,5}{0,002635} = 341,5 \text{ s} \approx 5,7 \text{ mins}$$

Aunque este tiempo no llega a 20 minutos, es razonable y el diseño es apropiado para la remoción de partícula de 0,1 mm. Por lo que se adoptan las dimensiones de $L=3 \text{ m}$, $B=0,6 \text{ m}$, $H=0,5 \text{ m}$.

Relación V_h/V_s

$$\frac{V_h}{V_s} = \frac{0,088}{0,079} = 1,11$$

Este valor es menor que el límite de 20 que exige el art. 55 del RAS, por lo que no habrá resuspensión de las partículas decantadas.

Diseño de la Tolva de Almacenamiento de Lodos

Debajo de la zona de sedimentación se construirá una tolva para recoger la arena decantada.

La tolva tendrá forma piramidal o de V.

El artículo 55 del RAS exige una pendiente mínima del 10% para asegurar el deslizamiento de la arena al punto de purga, por lo que se adoptará una pendiente del 60% en las paredes de la tolva.

El volumen de almacenamiento debe ser suficiente para acumular los sedimentos entre ciclos de limpieza. Se asumirá una limpieza semanal y un volumen adicional de 0,3 m³ para la tolva.

Se instalará una tubería de PVC de 4" en el fondo de cada tolva, controlada por una válvula de compuerta para permitir evacuación rápida y eficiente de los lodos.

Diseño de Estructuras de Entrada y Salida

Se diseñará una transición suave desde el canal de aducción (ancho 0,40 m) hasta el ancho de la unidad de desarenación (0,60 m). Después, se instalará una pantalla deflectora perforada. Esta pared con orificios distribuidos uniformemente disipa la energía de entrada y garantiza que el flujo ingrese a la zona de sedimentación de manera laminar y homogénea en la sección transversal.

Al final de la zona de sedimentación, se construirá un vertedero de salida de pared delgada que abarcará el ancho de la unidad (0,60 m). Este vertedero controlará el nivel de agua dentro del desarenador (H=0,50 m) y permitirá que el agua clarificada rebose hacia el canal de salida sin perturbar el lecho de sedimentos.

Tabla 3. *Resumen de Dimensiones Finales de Desarenador*

Componente/Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
General (por unidad)	Número de Unidades	-	2
	Caudal de Diseño	Q _{unidad}	2.64
	Partícula de Diseño	d	0.1
	Velocidad de Sedimentación	V _s	7.9
	Velocidad Horizontal de Diseño	V _h	88
	Largo	L	3.0
Zona de Sedimentación	Ancho	B	0.6
	Profundidad de agua	H	0.5
	Área Superficial	A _s	1.8
	Tiempo de Retención Hidráulico	Tr	5.7
Tolva de Lodos	Volumen de almacenamiento		0.3
	Pendiente de paredes		> 60
	Diámetro Tubería de Purga		4
Estructuras Adicionales			Pantalla deflectora perforada a la entrada Vertedero de rebose a la salida

Resumen y Recomendaciones Finales

A continuación, se presenta el resumen ejecutivo de las dimensiones calculadas y las recomendaciones para las siguientes fases del proyecto.

Resumen Ejecutivo de Dimensiones

Bocatoma Lateral

Vertedero de Captación: L de 0,75 m

Rejilla de Entrada: Ancho de 0,75 m, altura de 0,40 m, con barras de 1 cm de espesor y espaciamiento libre de 2,5 cm.

Canal de Aducción (Rectangular): Ancho de 0,40 m, altura de 0,30 m.

Desarenador de Flujo Horizontal

Dimensiones por Unidad

Largo: 3,0 m

Ancho: 0,6 m

Profundidad del agua: 0,5 m

Tolva de lodos: Pendiente de paredes de al menos 60%, con tubería de 4" de diámetro.

Estructuras de Control: Pantalla deflectora a la entrada y vertedero de control a la salida.

Recomendaciones para Fases Futuras del Proyecto

El presente es un estudio de prefactibilidad con la información disponible de los estudios existentes y normativa vigente. Para avanzar en fase de diseño detallado y construcción se requiere:

Estudios de Campo: Es obligatorio realizar estudios topográficos detallados en el sitio exacto para estas estructuras, y corroborar la información del estudio geotécnico anexo junto con un estudio geotécnico in situ para determinar la capacidad portante del suelo y las condiciones de cimentación finales.

Diseño Estructural: Con base en estas dimensiones, y resultados del estudio geotécnico, es deber de un ingeniero estructural competente la elaboración del diseño estructural completo, junto con el cálculo y el detalle del acero de refuerzo, espesor de muros y losas de concreto.

Sistema de Tratamiento Completo: Teniendo en cuenta el estudio hidrológico, la calidad del agua cruda de la fuente se ve comprometida por diversas fuentes de contaminación. Este desarenador actúa como primera etapa del tratamiento. Es necesario el diseño de una PTAP completa (con sus procesos de coagulación, floculación, sedimentación secundaria, filtración y desinfección) para garantizar que el agua a suministrar a la población cumpla con los estándares de potabilidad de acuerdo con la Resolución 2115 de 2007.