

VOLUMEN ÓPTIMO DE ALMACENAMIENTO PARA LA REGULACIÓN DE LA LLUVIA COMO ABASTECIMIENTO EN VIVIENDA RURAL - Aplicación en el centro de Antioquia -

***Paola A. Roldán, Jorge E. Arango, Hernán A. Moreno,
Jaime I. Vélez, José V. Guzmán, y Germán Poveda***
*Posgrado en Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos
Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
paroldan@unalmed.edu.co*

Recibido para evaluación: 17 de Junio de 2005 / Aceptación: 25 de Agosto de 2005 / Recibida versión final: 29 de Agosto de 2005.

RESUMEN

En la búsqueda de nuevas alternativas para el abastecimiento de agua potable para viviendas rurales y comunidades aisladas, se realiza la exploración de la disponibilidad de agua lluvia en una región del centro-occidente de Colombia, a través de una metodología propuesta. Basados principalmente en la disponibilidad de información, se selecciona un contexto geográfico para aplicar la metodología y se describe el ámbito climático principalmente representado por los ciclos anuales de lluvia y la distribución espacial de la misma en el área de estudio. La metodología para evaluar la potencialidad en cantidad de los sistemas de abastecimiento de agua, se basa en la regla Normal de Operación orientada a la regulación de fracciones de la lámina media diaria precipitada sobre 1 m² de área horizontal de captación, la cual permite encontrar el volumen de almacenamiento requerido para garantizar un suministro diario con una confiabilidad α . Este procedimiento obedece a un proceso iterativo de cálculo. Con el fin de generalizar la aplicación de los resultados se construyen curvas de regulación adimensionales, se analiza la operación del sistema y se realiza la aplicación ingenieril de dimensionamiento del almacenamiento requerido para una condición especial con información histórica de lluvia.

PALABRAS CLAVES: Lluvia, Abastecimiento, Almacenamiento.

ABSTRACT

Searching for new water supply alternatives for rural households and isolated communities, a research about the availability of rainwater over a region of the Colombian Andes is performed, in which a new methodology is proposed. Based mainly on the availability of information, a geographic context is chosen and a description of the rain field and annual cycle is made. The methodology to evaluate the feasibility (relative to the amount available) of the water supply systems, is based on the Normal Operation Rule to regulate a percent of the daily average precipitation over 1 m² of horizontal catchment area. It allows to find the volume of reservoir required to guarantee a daily amount of water with confidence α . This procedure obeys to an iterative completing process of calculus. Non-dimensional regulation curves are constructed and analysis of the system operation is presented. Finally an application of this methodology is fulfilled to find the volume of reservoir required for an especial condition with historical rain information.

KEY WORDS: Rain, Water Supply, Storage..

1. INTRODUCCIÓN

Dada su estratégica ubicación geográfica en medio de dos mares y la influencia de la selva amazónica, Colombia puede considerarse un país rico en disponibilidad de agua lluvia (Poveda y Mesa, 1997). Este país posee una precipitación media anual de 3000 mm que comparada con el promedio de precipitación de Sur América de 1600 mm y mundial de 900 mm es alta y sub aprovechada (IDEAM, 2002). Paradójicamente, en todo el territorio nacional existen zonas con baja disponibilidad del recurso y otras con deficiencias en los sistemas de abastecimiento en temporadas críticas de estío (IDEAM, 2002), además de las limitaciones de uso que implica la alteración de la calidad del agua por contaminación, e incremento de los volúmenes de sedimentos como resultado de procesos de erosión natural o derivados de la acción antrópica que acelera los procesos de degradación de las cuencas. En muchas partes del mundo, la lluvia es la fuente más utilizada para obtener agua potable, especialmente en aquellos países golpeados por grandes sequías (Evenari et al., 1971; ITDG, 2003; Zaunderer y Hutchinson, 1988; Pacey y Cullis, 1986). En el caso de Colombia,

algunas comunidades recogen agua lluvia en sus hogares, sin embargo, no hay documentación de sistemas organizados que garanticen hacer un buen aprovechamiento del recurso.

2. DATOS Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Para propósitos prácticos y de aplicación, se escogió un área del centro de Antioquia de aproximadamente 9700 km2, más exactamente entre las latitudes 5.9° N a 6.9° N y las longitudes 75.1° W a 75.9° W. El criterio básico para la selección de esta zona es la disponibilidad de un buen número de estaciones de lluvia con resolución temporal diaria y con series no menores a 30 años de longitud. En la Tabla 1 se recopila información de las 20 estaciones de lluvia seleccionadas para desarrollar este estudio, todas pertenecientes a la base de datos de Empresas Públicas de Medellín.

La Figura 1 ilustra la ubicación de las 20 estaciones de trabajo en el área de estudio así como las 168 estaciones utilizadas en la interpolación del campo de precipitación media anual.

TABLA 1. Estaciones de lluvia diarias utilizadas para este estudio en la región del centro de Antioquia

Identificación	Código estación	Nombre de la estación	Municipio	Latitud (°N)	Longitud (°W)	Altura msnm	Precipitación Media anual (mm)	Año inicial	Año final
1	2308021	La Fe	El Retiro	6.10	75.50	2150	2023	1949	1989
2	2308022	La Severa	Guarne	6.27	75.45	2170	1796	1949	1989
3	2308023	Las Palmas	El Retiro	6.15	75.53	2495	1886	1949	1994
4	2308024	Vasconia	Rionegro	6.20	75.48	2510	2196	1949	1997
5	2308026	La Mosca	Guarne	6.32	75.47	2250	1900	1950	1991
6	2308027	La Macaré	Rionegro	6.15	75.37	2070	1909	1950	1989
7	2308034	Riobajo	San Vicente	6.25	75.32	2070	1983	1959	1991
8	2618009	El Buey	Abejorral	5.92	75.45	2110	1925	1959	1997
9	2701035	Chorrillos	Medellín	6.30	75.50	2353	1710	1949	1998
10	2701036	Caldas	Caldas	6.07	75.63	1875	2610	1950	1991
11	2701037	Fabricato	Bello	6.37	75.60	2422	1770	1950	1988
12	2701038	San Antonio de Prado	Medellín	6.18	75.67	2000	2086	1950	1991
13	2701045	Villa Hermosa	Medellín	6.27	75.55	1690	1559	1949	1987
14	2701046	San Cristóbal	Medellín	6.28	75.63	1890	1689	1950	1991
15	2701051	El Botón	Sta Rosa de Osos	6.67	75.57	2500	1814	1959	1991
16	2701065	Don Matías	Don Matías	6.48	75.40	2200	2394	1959	1997
17	2701066	Gabino	Santo Domingo	6.55	75.22	1080	3156	1964	1999
18	2702012	Angostura	Angostura	6.88	75.33	1675	2878	1959	1997
19	2702013	La Teresita	Yarumal	6.87	75.45	2560	2695	1959	1983
20	2702014	Miraflores	Carolina	6.78	75.32	2015	3105	1963	1995

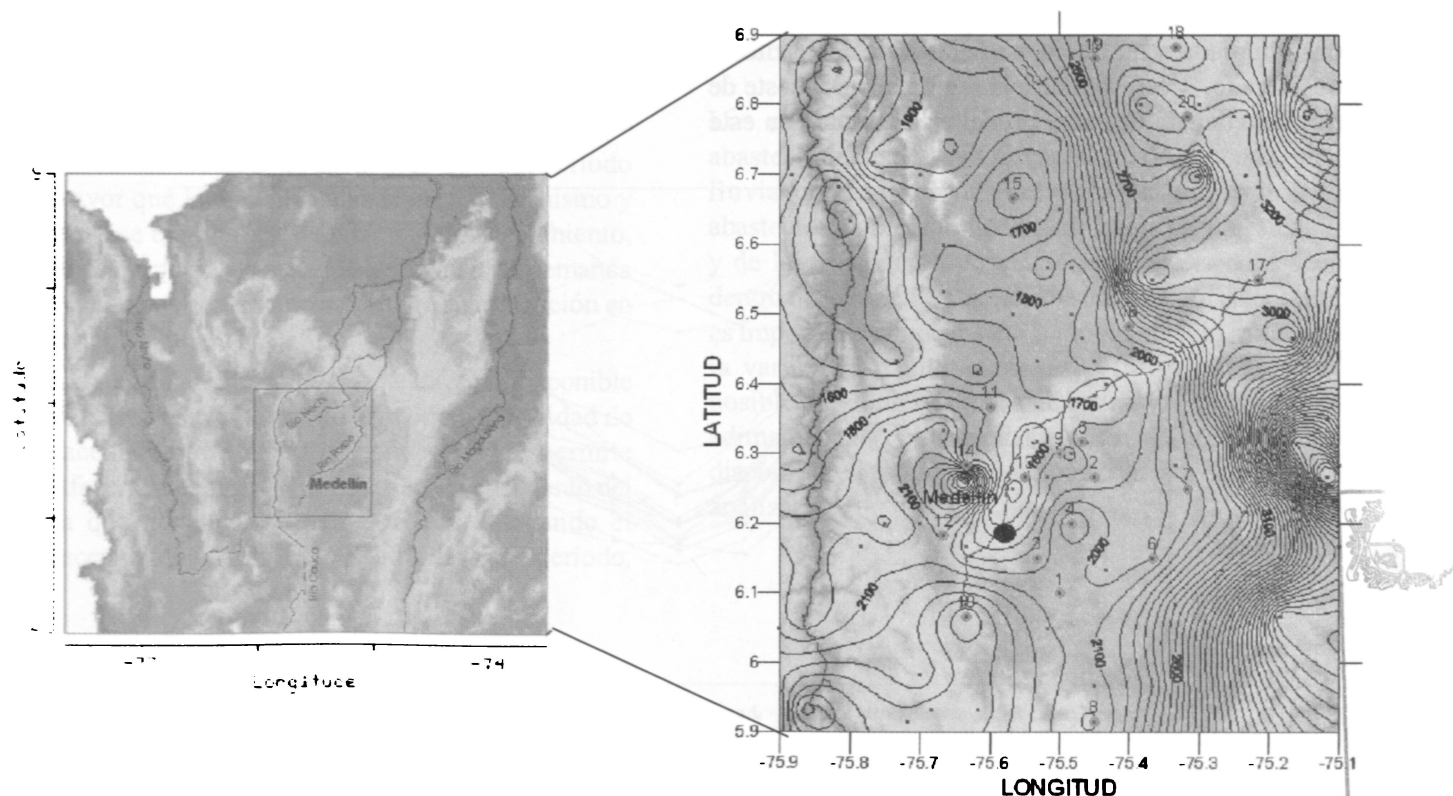


FIGURA 1. Isoyetas de precipitación total anual y ubicación de las estaciones de estudio. Los puntos rojos indican las estaciones usadas para el análisis de la regulación de la lluvia diaria. Los azules, son las estaciones complementarias usadas para la interpolación del mapa de isoyetas totales anuales.

2.1. Isoyetas Anuales de la Región Estudiada

La Figura 1 ilustra también las isoyetas medias totales anuales. Este mapa se elaboró a partir de la información disponible de lluvias en las estaciones pluviométricas, pluviográficas, climatológicas principales, climatológicas ordinarias y agrometeorológicas localizadas dentro y cerca de la región en estudio, para lo cual se utilizó la información de lluvias registrada en un total de 183 estaciones de medición, interpoladas mediante la utilización del método de Krigging con apoyo en la topografía y en los datos de circulación general de vientos de la zona. En esta figura, pueden apreciarse variaciones espaciales significativas de la precipitación en distancias relativamente cortas, efecto de la topografía en la distribución espacial de la lluvia. Se presenta mayor precipitación en el costado oriental correspondiente a la vertiente oriental del valle del río Medellín y la región nor-oriental (Valle del río Porce). Las zonas menos lluviosas se ubican hacia el norte y nor-occidente sobre el valle del río Cauca.

2.2. Ciclo Intra-Anual Promedio Multianual de la Precipitación

El ciclo intranual promedio multianual de la precipitación registrada en las 20 estaciones estudiadas, se presenta en la Figura 2. Dicha figura permite la observación de dos grupos de estaciones con tendencias intra-anales bien definidas, en las cuales se aprecian dos sectores:

Sector 1: Comportamiento intra-anual relativamente unimodal de la precipitación. Corresponde a la sub-región nor-oriental de la zona estudiada, representada por el comportamiento de las estaciones Miraflores, Angostura, La Teresita y Gabino. Para propósitos prácticos corresponde a la zona de la cordillera Central al norte de la cuenca del río Grande, cuya ladera se encuentra a barlovento de los influjos de humedad que ingresan desde el Bajo Cauca a través del cañón del río Porce.

Sector 2: Comportamiento intra-anual bimodal de la

precipitación. Corresponde a la sub-región restante de la zona estudiada, y que incluye a la mayoría del territorio considerado. Corresponde a la región al sur y oeste de la cuenca del río Grande, la cual está incluida en este

Sector. La dinámica anual de lluvias está en concordancia con la descrita para la zona andina colombiana, la cual responde al movimiento de la zona de convergencia intertropical (Mesa et al, 1997).

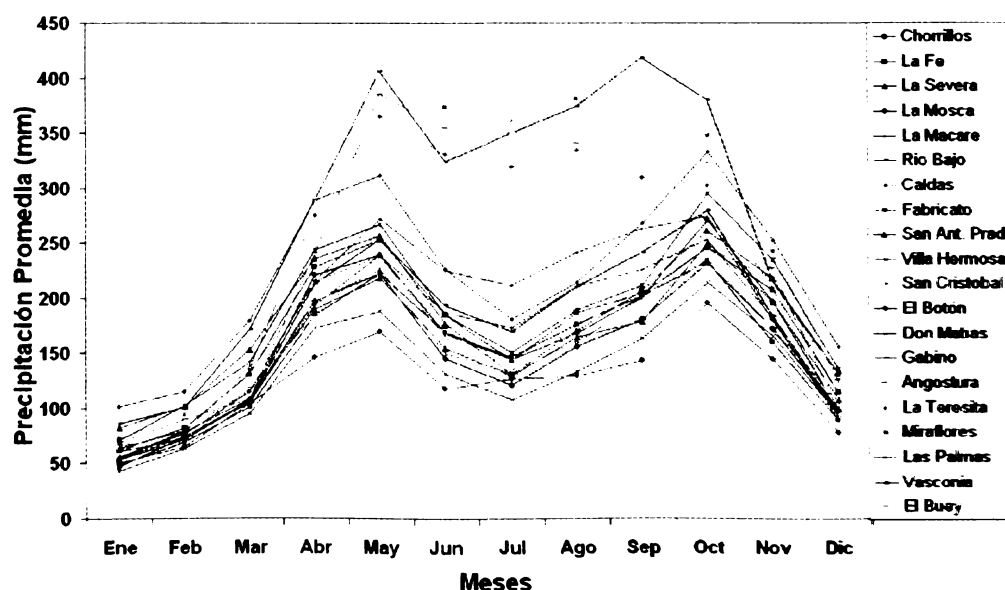


FIGURA 2. Ciclo intra-anual promedio multianual de la precipitación en las 20 estaciones del área de estudio

3. CURVAS DE REGULACIÓN ADIMENSIONALES DE LA LLUVIA

Para el procesamiento de la información se tomaron series continuas de lluvia diaria a partir de pluviógrafos y pluviómetros, con registros de años completos (ver Tabla 1). Para los propósitos de la aplicación de un modelo de simulación basado en la utilización de la Regla Normal de Operación (método explicado más adelante), las afluencias al almacenamiento (embalse) con el que se atenderá la demanda, corresponden a los aportes de lluvia diaria (mm/día), re-expresada en términos de volúmenes de lluvia disponibles sobre un área unitaria de captación de la misma (1 mm de lluvia en 1 m² de superficie equivale a 1 litro así: 1 m² x 0.001 m = 1 m³). De esta forma, los volúmenes así obtenidos tienen el mismo significado de los caudales afluentes a un embalse convencional cuando se analiza la capacidad de regulación de un volumen del mismo; los valores de la lluvia así transformados son también denominados con el término “caudal” en este trabajo. Se construyen entonces curvas adimensionales de regulación que expresan en el eje de las ordenadas el caudal regulado como una fracción del caudal medio

diario y en el eje de las abscisas el almacenamiento requerido como una fracción del volumen medio anual. La definición de la confiabilidad asociada al caudal regulado por el sistema de abastecimiento considerado se determina con base en el número de fallas aceptadas, siendo éstas las correspondientes al número de períodos (días) en los cuales no es posible abastecer plenamente la demanda considerada. La simulación se realizó para confiabilidades (α) del 99.5, 99.6, 99.7, 99.8 y 99.9% y mediante un proceso iterativo se repite el procedimiento para un conjunto de valores de capacidad de almacenamiento útil evaluado, obteniéndose la curva de regulación. El máximo número de fallas permitidas para una confiabilidad determinada a (%), en un período total de tiempo de simulación N, es igual a $(1 - \alpha)N$.

Para los propósitos de este estudio, la Regla Normal de Operación se aplica de la siguiente manera:

- Si el agua disponible en un período de operación cualquiera, que es igual al volumen al final del período anterior, más los aportes netos durante el período actual, es menor que la demanda del período, entonces

se suministra a la demanda el volumen de agua disponible, quedando el almacenamiento vacío. En este caso se produce un déficit en el abastecimiento de la demanda, siendo esta parcialmente atendida.

- Si el volumen total de agua disponible en el período es mayor que la demanda a abastecer en el mismo y menor que el volumen máximo de almacenamiento, entonces se podrá abastecer la totalidad de la demanda y el excedente será almacenada para su utilización en el período siguiente.
- Puede suceder que el volumen total de agua disponible en el período sea mayor que la máxima capacidad de almacenamiento más la demanda, lo que permite satisfacerla plenamente, ocurriendo el vertimiento del agua que no puede ser almacenada, quedando el almacenamiento totalmente lleno al final del período.

Los resultados de la operación del sistema de almacenamiento de lluvia se ilustran en la Figura 3.

Las características de operación del sistema de abastecimiento de agua lluvia evaluado dependen de la lluvia promedio anual del sitio, la demanda a ser abastecida, la confiabilidad establecida para su atención y de la distribución y duración de los periodos secos dentro de la serie de tiempo considerada. En esto último, es importante conocer y caracterizar el ciclo intranual y la variabilidad interanual de la lluvia para llegar a posibles regionalizaciones de las curvas de regulación adimensionales construidas a partir de la información disponible en sitios de medición localizados en la región analizada.

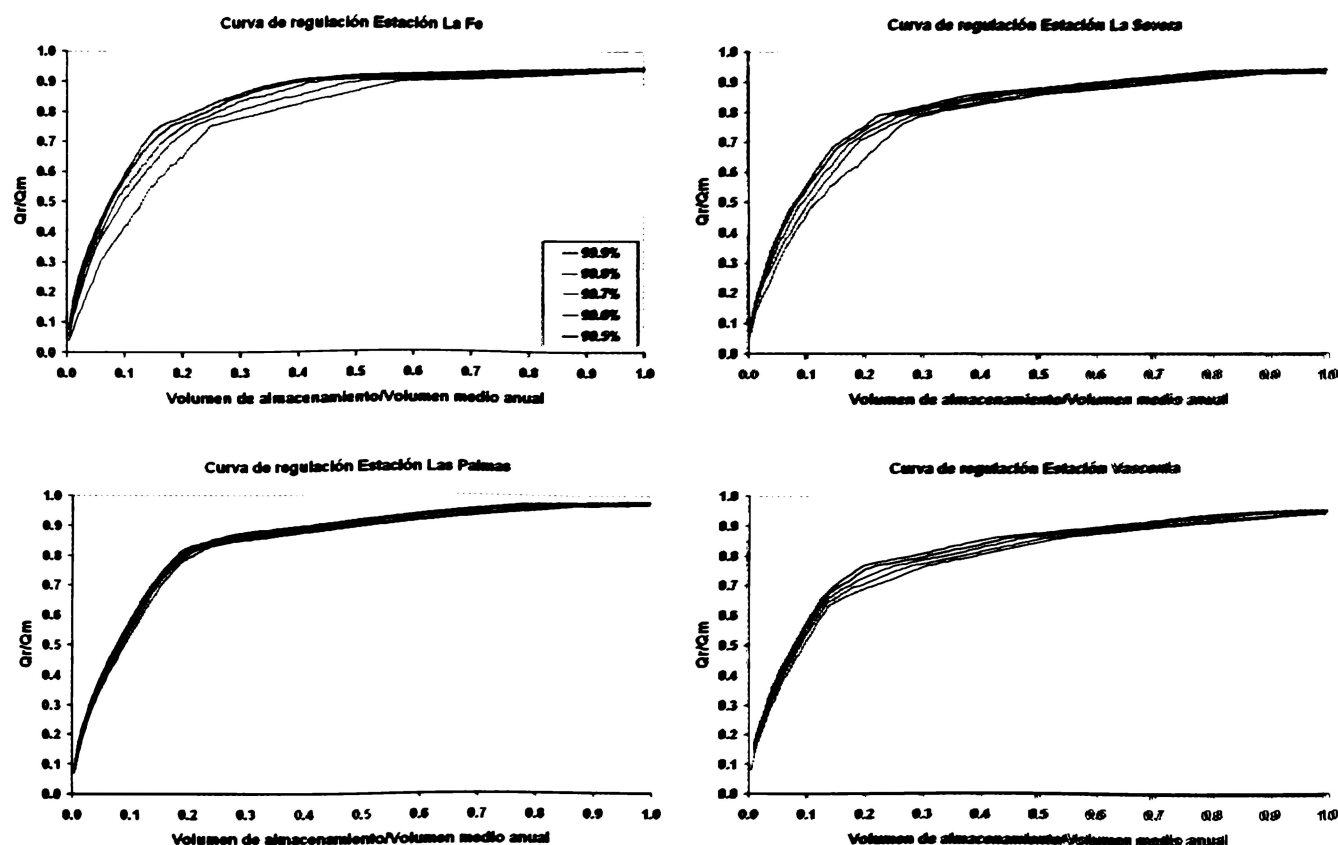


FIGURA 3. Curvas adimensionales de regulación de la lluvia para las 20 estaciones de estudio

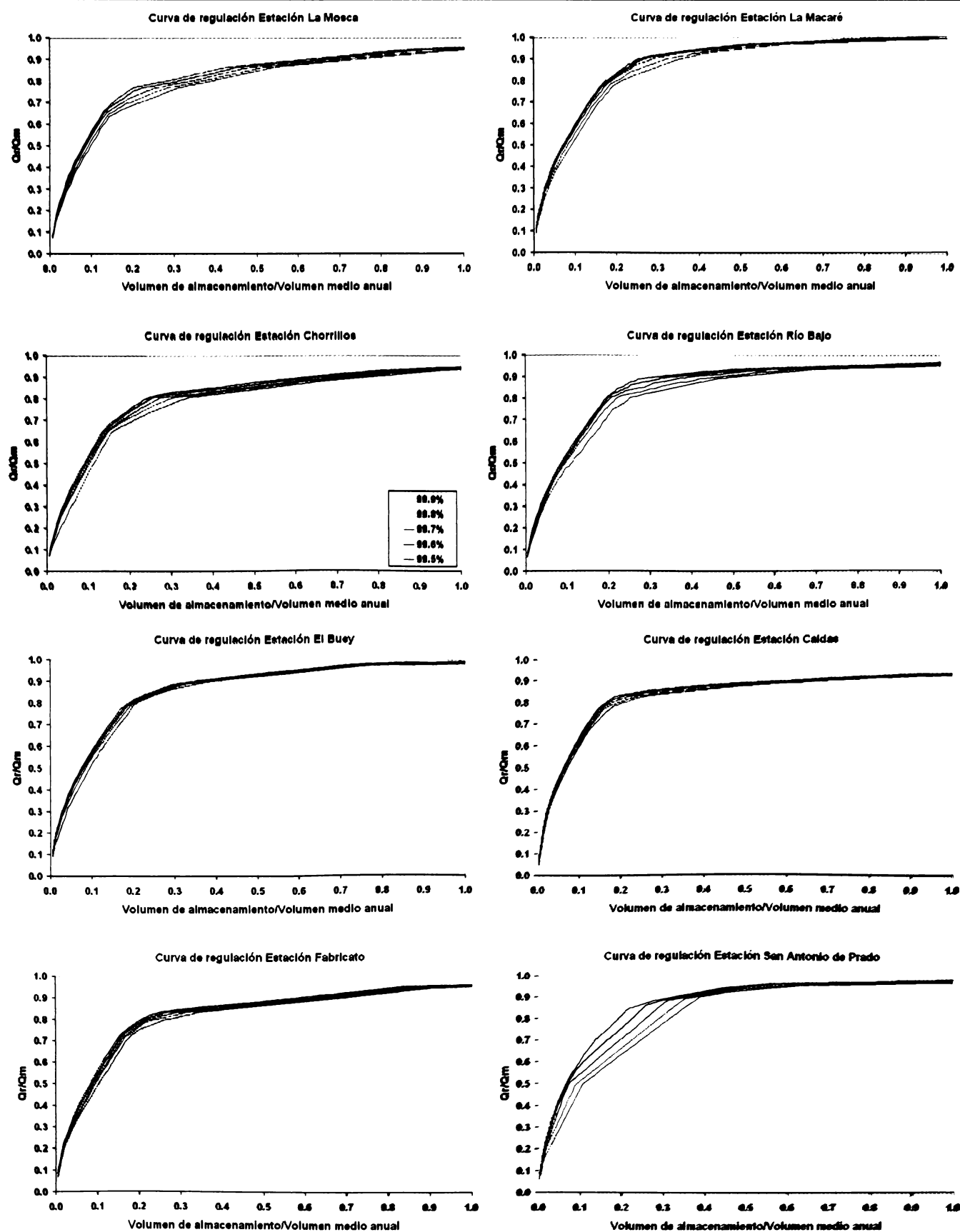


FIGURA 3. Continuación. Curvas adimensionales de regulación de la lluvia para las 20 estaciones de estudio.

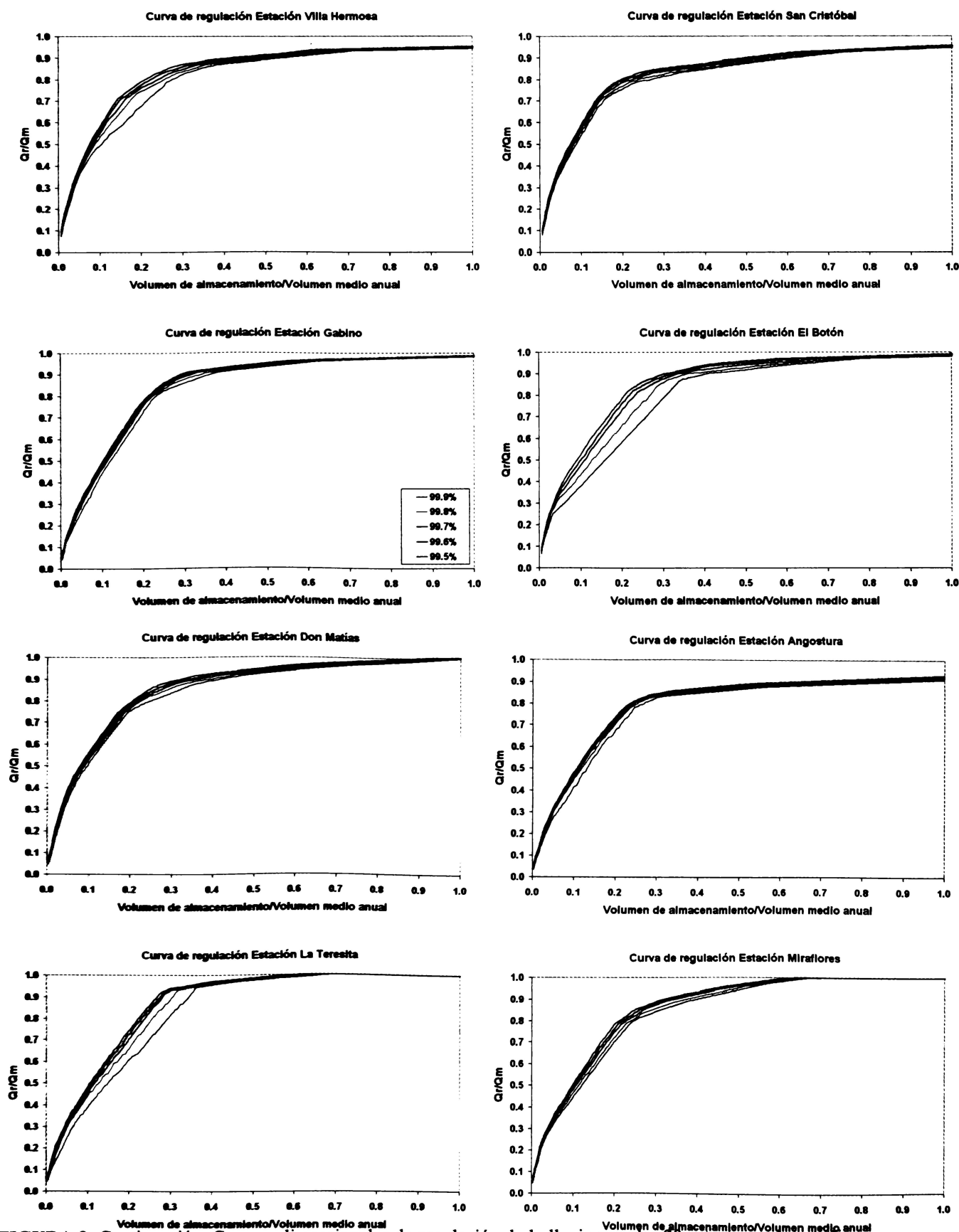


FIGURA 3. Continuación. Curvas adimensionales de regulación de la lluvia para las 20 estaciones de estudio

4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD POR LONGITUD DE LA SERIE

La forma de la curva de regulación obtenida de los registros diarios de una estación de medición es sensible a la longitud del registro de lluvia disponible, ya que mientras más largo el número de años, se tiene mayor información de sequías más severas. Este tipo de característica es bien conocida de tiempo atrás en los análisis de sistemas de almacenamiento y regulación de caudales de ríos, en los cuales se ha establecido que los requerimientos de volúmenes de almacenamiento para el

abastecimiento de una demanda está vinculado a la longitud de la serie de tiempo usada para realizar la simulación de la operación del sistema, directamente relacionado con el denominado fenómeno de Hurst (Hurst, 1965). Con un fin práctico, se realizó un análisis de sensibilidad para las estaciones Chorrillos y Vasconia por contarse con una longitud larga de registro histórico, considerando en dicho análisis períodos de 10 a 50 años de registro (cada cinco años) comenzando en 1949 y adoptando como confiabilidad un valor de 99.9%. La Figura 4 muestra los resultados.

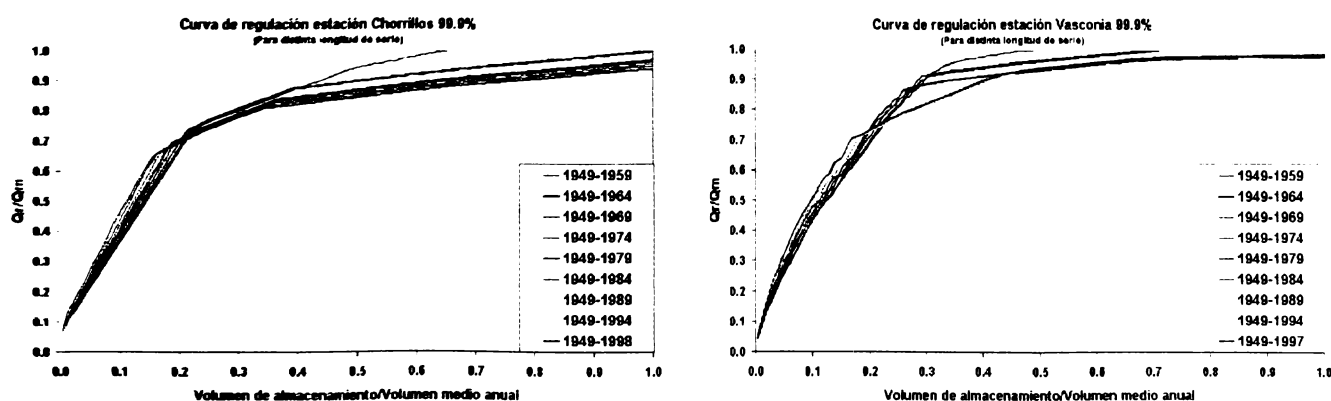


FIGURA 4. Curva de Regulación adimensional para diferentes longitudes de serie. Estaciones Chorrillos y Vasconia

La Figura 4 muestra diferencias en las curvas de regulación de cada estación para las diferentes longitudes de registro. Se observa además que el comportamiento no es el mismo entre estaciones. Estas variaciones son debidas a que el período más largo de fallas consecutivas (el más crítico) se ubica de manera diferente dentro de la serie dependiendo de la longitud de registro. Además, se debe tener en cuenta que las curvas se construyen teniendo una confiabilidad fija, lo que indica que el número de fallas que se aceptan en la simulación, que dependen directamente de la longitud del registro, es menor a medida que se acorta el registro. Por todo lo dicho anteriormente, hay mucha incertidumbre en los resultados. Sin embargo, tratando de obtener resultados en lo posible más veraces, se construyeron las curvas de regulación adimensionales de cada estación con la mayor longitud de información de precipitación que se tenía disponible.

5. CURVA DE REGULACIÓN DE LA REGIÓN ESTUDIADA

La idea del procedimiento de regionalización es que se pueda utilizar la curva representativa de una región en sitios, dentro de esta región, donde haya poca o ninguna información de precipitación y que por medio de esta curva, se pueda obtener el volumen de tanque que se necesita para la implementación del sistema de recolección de lluvia según una confiabilidad dada. Sin embargo, es aconsejable utilizar una curva de regulación de alguna estación construida en este trabajo que esté cercana al sitio donde se quiera implementar el sistema ya que éstas son construidas con el mayor registro que se tenía disponible.

El procedimiento para la obtención de la curva representativa de la región se basa en la escogencia de un período de registro común (1964-1983) entre los dos sectores anteriormente descritos. Una vez escogido el

período de registro común, se construyeron y agruparon las curvas de regulación de las 20 estaciones junto con curvas de regulación construidas con el registro completo para verificar que éstas quedaran incorporadas dentro de las envolventes inferior y superior de la franja que agrupa las curvas; mediante esta exploración se encontró que las estaciones correspondientes al Sector 1 quedaban incluidas indistintamente dentro de la franja (ver Roldán y Arango, 2004). Por lo tanto, se escogió la envolvente inferior de la franja (propuesta que garantiza el diseño más conservador) como curva representativa de toda la región sin hacer distinciones por sector. Este procedimiento se hizo con cada confiabilidad obteniéndose un total de cinco curvas correspondientes a las cinco confiabilidades utilizadas en el trabajo que se pueden observar en la Figura 5.

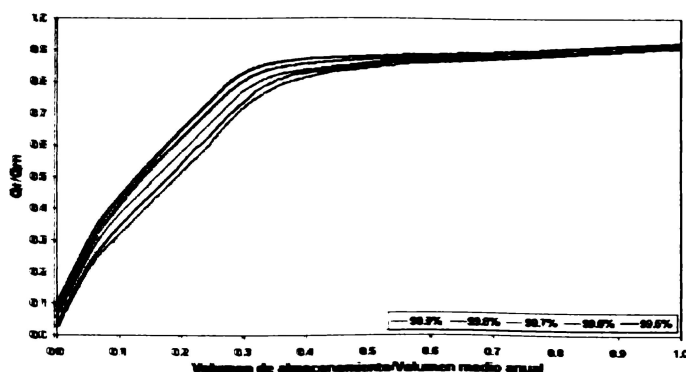


FIGURA 5. Curva de regulación adimensional de caudales propuesta como diseño para la región de estudio

El mapa de isoyetas es una herramienta esencial dentro de este estudio hidrológico, ya que no solamente permite la representación gráfica de la distribución espacial de la precipitación en una región dada, sino que también proporciona la información necesaria para la determinación del volumen de tanque para la captación de lluvias en sitios que carezcan de información directa de precipitación. El valor puntual de la lluvia total anual promedio multianual es importante, porque las curvas de regulación regionalizadas en este trabajo están expresadas en términos de este valor, parámetro éste que se usa en el proceso de adimensionalización de las mencionadas curvas.

6. EJEMPLO DE APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

Se supone que una vivienda está ubicada relativamente cerca de la estación pluviográfica Chorrillos (ver Figura 3) y se quiere implementar un sistema de almacenamiento de agua lluvia con el fin de suplir sólo el 50% de las necesidades de agua para consumo humano ya que el otro 50% es agua no potable para otros usos en el hogar. Se trabajará con una confiabilidad (a) del 99.9% (equivalente en promedio a 9 días sin capacidad de abastecimiento de agua en 24 años, que pueden ser consecutivos en el caso más drástico de períodos secos asociados con las temporadas secas del año y posiblemente también a eventos cálidos ENSO). El área de captación de agua lluvia (techo) es $A_c = 100 \text{ m}^2$; el número de habitantes residentes en la casa es $N_h = 4 \text{ hab}$; La precipitación diaria media multianual para Chorrillos es $P_{md} = 5.52 \text{ mm/día}$ (equivalente a 2015 mm/año); el coeficiente de escorrentía es $C_e = 0.85$ (techo de tejas de arcilla) y la dotación es $Dot = 150 \text{ litros/hab/día}$.

- Determinación de la demanda que el almacenamiento debe abastecer:

$$D_i = N_h \cdot Dot = 600 \text{ litros/día}$$

Como se requiere suplir sólo el 50% de las necesidades de agua, la demanda diaria total asignada al sistema analizado será de $Q_r = 0.5 D_i = 300 \text{ litros/día}$.

- Determinación de la lluvia media multianual disponible, expresada en términos de un caudal diario medio multianual (Q_m). Teniendo en cuenta los promedios diarios de precipitación de todos los años evaluados y el coeficiente de escorrentía del material del techo, se procede a determinar la cantidad de agua que se puede captar con el equivalente a la precipitación diaria media multianual:

$$Q_m = P_{md} \cdot A_c \cdot C_e = 469.2 \text{ litros/día}$$

- El caudal regulado adimensional sería:

$$\frac{Q_r}{Q_m} = \frac{300 \text{ litros/día}}{469.2 \text{ litros/día}} = 0.639$$

Este valor se debe ubicar en la curva de regulación del 99.9% de confiabilidad de la estación chorrillos para así obtener la relación entre el volumen de almacenamiento y el volumen medio anual, como lo ilustra la Figura 6.

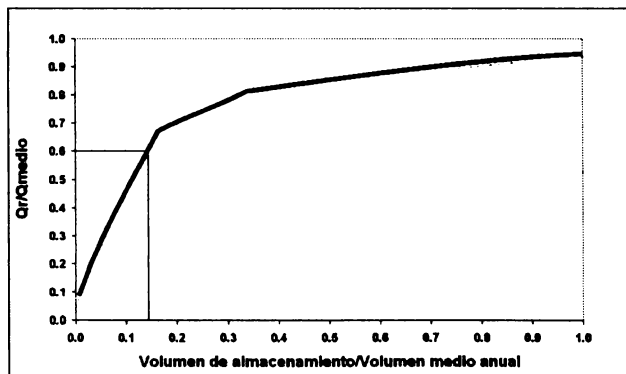


FIGURA 6. Curva de regulación para la lluvia en la estación Chorrillos para $a = 99.9 \%$

- De la curva se obtiene el siguiente valor:

$$\frac{V_{\text{almacenamiento}}}{V_{ma}} = 0.145$$

- Determinación del volumen medio anual correspondiente a la precipitación media multianual (V_{ma}):

$$V_{ma} = 365 \text{ días} \cdot Q_m = 469.2 \frac{\text{litros}}{\text{día}} \times 365 \text{ días} = 171258 \text{ litros}$$

- Determinación del volumen de almacenamiento útil para la regulación deseada:

$$V_{\text{almacenamiento}} = 0.145 \cdot V_{ma} = 24832 \text{ litros} \approx 24.8 \text{ m}^3$$

Este almacenamiento se puede conformar mediante la construcción de un tanque de 3 m x 3 m de base y 2.95 m de altura útil. Naturalmente, como es usual, el tanque que finalmente sea construido deberá proveerse, adicionalmente, de un bordé libre para controlar reboses y un almacenamiento de lodos en el fondo, dimensiones adicionales que determinan el volumen inactivo o “muerto” del almacenamiento.

7. CONCLUSIONES

Se planteó una metodología para la estimación de la disponibilidad de agua lluvia como recurso hidráulico

para el abastecimiento de agua potable a nivel del hogar en zonas rurales.

Se realizó la construcción de curvas de regulación, las cuales permiten representar el caudal regulado en el eje de las ordenadas con el volumen requerido de almacenamiento; se optó por tener medidas adimensionales relativas al volumen medio de lluvia para 1 m² de área horizontal de captación (abscisas) y el caudal regulado como una fracción del caudal medio propiciado por la lluvia media anual (ordenadas).

La regulación depende del número de fallas permitidas al sistema, la lluvia (caudal) a regular, la distribución de los períodos secos en la serie de tiempo y la duración de los mismos y de la cantidad de lluvia anual de cada estación. Las curvas de regulación no se ven afectadas por el ciclo intra-anual de precipitación sino por el verano de principio de año comprendido entre diciembre y abril, cuando el tanque tiende a vaciarse.

Un análisis de la operación del sistema se debe realizar siempre que se use esta metodología para pre-dimensionar tanques para agua lluvia, pues la confiabilidad asumida está fuertemente ligada a la longitud de la serie utilizada y al número de fallas permitidas en ese mismo tiempo (horizonte de planificación). Es obvio que entre más larga sea la serie de precipitación, mayor será el horizonte de planificación y más períodos críticos serán tomados en cuenta. Esto tiene que ver directamente con el exponente de Hurst (Hurst, H.E, 1965, Poveda, 1998; Moreno, H.A., 2005).

Pese a la variabilidad climática en la zona, las diferencias en las curvas de regulación adimensionales son pequeñas y por tanto, se construyó una curva de regulación que represente la región del centro de Antioquia estudiada para ser utilizada en sitios donde no se tienen registros directos de precipitación.

A la hora de diseñar es preferible hacerlo en el primer tramo de la curva de regulación propuesta para la región (aunque esto es aplicable a casi todas las curvas de regulación construidas en el trabajo) para regular, aproximadamente, hasta el 30% del caudal medio diario almacenando el 6.5% del volumen medio anual, estos valores cambian un poco dependiendo de la confiabilidad del sistema utilizada.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Evenari M., Shanan, L., y Tadmor, N., 1971. The Negev: the challenge of a desert. Harvard University Press, p. 345.

Hurst H.E., 1965. Long-Term Storage: An experimental study. Constable, London.

IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales,. 2002. Estudio Nacional de Aguas. p. 253, Página web: www.ideam.gov.co

ITDG: Intermediate Technology Development Group. Rainwater harvesting. Inglaterra, 2003. Página web: www.itdg.org

Mesa, O. J., Poveda, G., y Carvajal, L. F., 1997. Introducción al clima de Colombia. Imprenta Universidad Nacional de Colombia.

Moreno, H., 2005. Metodología para la Implementación de Sistemas de Aprovechamiento Integral de Agua Atmosférica. Universidad Nacional de Colombia. Tesis Posgrado. Maestría en Ingeniería-Recursos Hidráulicos, p. 77.

Pacey, A., y Cullis, A., 1986. Rainwater harvesting: the collection of rainfall and runoff in rural areas. IT Publications. London, UK.

Poveda, G., y Mesa, O. J., 1997. Feedback between hydrological processes in tropical south America and large-scale ocean-atmospheric phenomena. J. Climate, pp. 2690-2702.

Poveda, G., 1998. El fenómeno de Hurst. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Tesis Posgrado en Aprovechamiento de los Recursos Hidraulicos. p. 307.

Roldán, P., y Arango, J., 1991. Volumen de almacenamiento para la regulación de agua lluvia como abastecimiento en vivienda rural. Aplicación en el centro de Antioquia. Trabajo Dirigido de Grado. Universidad Nacional de Colombia.

Zaunders, J., y Hutchinson, C.F., 1988. A review of water harvesting techniques of the Arid Southwestern US and North Mexico. (Draft). Working paper for the World Bank's Sub-Saharan Water Harvesting Study.

