

## APÉNDICE 1

### METODOLOGÍA PARA LA DEFINICIÓN DE LAS ZONAS DE CAPTURA DE POZOS Y MANANTIALES PARA PROYECTOS DE PROTECCIÓN DEL RECURSO HÍDRICO SEGÚN LA METODOLOGÍA TARIFARIA DE ARESEP.

#### 1. CONSIDERACIONES GENERALES

Para la delimitación de zonas de captura de pozos y manantiales recomienda utilizar la **Metodología de Flujo Uniforme**, sin embargo, antes de iniciar con la explicación de las geometrías a calcular y delimitar en las fuentes es pertinente aclarar lo siguiente:

- a) Para los pozos perforados y manantiales se tiene que resguardar una **Zona de Protección Absoluta Operacional** con un polígono de 30 metros por 30 metros, inclusive esta zona se puede considerar también como una zona de control sanitario.
- b) Aunque se realice el cálculo de las geometrías y el análisis de las zonas de captura en pozos perforados, las **Zonas de Protección Absoluta Operacional** no podrán ser menores a las distancias de 30 metros por 30 metros; que como se verá más adelante dichas áreas pueden estar contenidas en los resultados obtenidos en la modelación de la geometría de la zona de protección dentro del tubo de flujo.
- c) El modelo hidrogeológico conceptual, que sustente los parámetros utilizados debe ser definido utilizando criterios técnicos basados en un análisis geológico detallado del entorno como lo es la identificación y descripción de las formaciones geológicas presentes considerando sus características petrográficas y estructura geológica, apoyado en un levantamiento de campo y en la interpretación de la información litoestratigráfica que puedan brindar otros pozos del área de estudio para realizar un detallado modelo hidrogeológico conceptual; así como también el cálculo de los parámetros hidráulicos del acuífero, sustentados en las pruebas de campo y laboratorio.

#### 2. METODOLOGÍA DEL FLUJO UNIFORME (DETERMINACIÓN DEL TUBO DE FLUJO)

Tanto para pozos como para manantiales la **Metodología de Flujo Uniforme** para la delimitación de **Áreas de Protección** está basada en el análisis de flujo subterráneo utilizando la ecuación de Darcy:

$$Q = k * i * A \quad \text{o} \quad Q = T * i * L \quad (\text{ecuación 1})$$

En donde:

- Q= Caudal de bombeo del pozo o de producción de la naciente (m<sup>3</sup>/día).
- K= Conductividad hidráulica del acuífero (m/día).
- i= gradiente del flujo subterráneo.
- T= Transmisividad del acuífero (m<sup>2</sup>/día).
- L = Longitud del ancho del tubo de flujo (m).
- A = Área por donde pasa el flujo del agua subterránea (m<sup>2</sup>).

A continuación, se desarrolla la explicación con las fórmulas correspondientes para los pozos y los manantiales, las cuales son derivadas principalmente de la ecuación 1.

### 3. METODOLOGÍA DEL FLUJO UNIFORME (DETERMINACIÓN DEL TUBO DE FLUJO) EN POZOS PERFORADOS

#### 3.1 Demarcación del área de Protección Absoluta Operacional del Pozo

Para los pozos perforados se tiene que resguardar una **Zona de Protección Absoluta Operacional** de 30 metros por 30 metros, inclusive esta zona de puede considerar también como una zona de **control sanitario** de mucha utilidad por parte de los entes operadores de acueductos.

#### 3.2 Cálculo del tubo de flujo para pozos perforados

Para los pozos perforados la EPA (2001) publica un protocolo para la delimitación de las *Áreas de Protección* de pozos de abastecimiento público, esta metodología tiene las siguientes ecuaciones, tanto para acuíferos libres como para acuíferos confinados:

##### **Acuíferos Libres**

Para los acuíferos libres las ecuaciones a utilizar son las siguientes:

$$x_o = \frac{-Q \cdot L}{\left[ \pi \cdot k \cdot (h_1^2 - h_2^2) \right]} \quad (\text{ecuación 2})$$

$$x = \frac{-y}{\tan \left[ \frac{\pi \cdot k \cdot (h_1^2 - h_2^2) \cdot y}{Q \cdot L} \right]} \quad (\text{ecuación 3})$$

$$y_{\max} = \pm \frac{Q \cdot L}{k \cdot (h_1^2 - h_2^2)} \quad (\text{ecuación 4})$$

En donde para las ecuaciones 2,3, y 4 tenemos que:

- $x_0$ = Punto de no retorno aguas debajo de la fuente (m).
- $x$ = Distancia a lo largo de la zona de captura (m).
- $\pm y_{\max}$ = Ancho de la zona de captura (m).
- $Q$ = Caudal de bombeo de un pozo o el caudal de producción del manantial ( $\text{m}^3/\text{día}$ ).
- $k$ = Conductividad hidráulica del acuífero ( $\text{m}/\text{día}$ ).
- $L$ = Longitud entre dos puntos de observación del nivel freático (m).
- $h_1^2$  = Elevación mayor del nivel freático (m).
- $h_2^2$  = Elevación menor del nivel freático (m).
- $\pi = 3,14159$ .

### **Acuíferos Confinados**

Para los acuíferos confinados las ecuaciones a utilizar son las siguientes:

$$x_0 = -Q / (2 * \pi * k * b * i) \quad (\text{ecuación 5})$$

$$x = -y / (\tan \left[ \frac{2 * \pi * k * b * i}{Q} \right] * y) \quad (\text{ecuación 6})$$

$$\pm y_{\max} = \pm Q / (2 * k * b * i) \quad (\text{ecuación 7})$$

En donde para las ecuaciones 5,6 y 7 tenemos que:

- $x_0$ = Punto de no retorno aguas debajo de la fuente (m).
- $x$ = Distancia a lo largo de la zona de captura (m).
- $y$  = Ancho de la zona de captura e función de  $x$  (m).
- $\pm y_{\max}$ = Ancho de la zona de captura (m).
- $Q$ = Caudal de bombeo de un pozo o el caudal de producción de la naciente ( $\text{m}^3/\text{día}$ ).

- $k$  = Conductividad hidráulica del acuífero (m/día).
- $b$  = Espesor saturado del acuífero (m).
- $i$  = Gradiente hidráulico del acuífero (adimensional).
- $\pi = 3,14159$ .

Las fórmulas utilizadas en las ecuaciones 2,3 y 4 son para acuíferos libres, sin embargo, se considera que la mejor forma de utilizar la metodología es con las ecuaciones 5,6 y 7 para acuíferos confinados; por motivo de que la formulación para acuíferos libres necesita información más detallada del modelo hidrogeológico conceptual como por ejemplo con los datos  $h_1^2$  y  $h_2^2$ , sin embargo, no se descarta que la formulación para acuíferos libres pueda ser utilizada.

Para la construcción de la forma de la curvatura del tubo de flujo se aplica la ecuación 3; según la literatura a consultar el  $x_0$  se le nombra también  $x_L$  y al  $y_{max}$  también se le nombra como  $\pm y_L$ ; el esquema de la geometría que se obtiene del cálculo con las ecuaciones anteriores se ilustra en las figuras 1 y 2.

La **Zona de Protección Absoluta Operacional** corresponde a un polígono de 30 metros por 30 metros donde el pozo o manantial se ubique en el centro para proyectos de protección de recurso hídrico. Aunque en los cálculos posteriores las dimensiones de la zona de captura ( $x_0$ ,  $\pm y$ , radio fijo,  $d$ ) sean inferiores a un polígono 30 metros por 30 metros siempre se tendrá que respetar la **Zona de Protección Absoluta Operacional** ya descrita (punto 3.1).

Figura 1

Esquema en planta y perfil de la zona de captura para un pozo (tomado de Fetter, 1980)

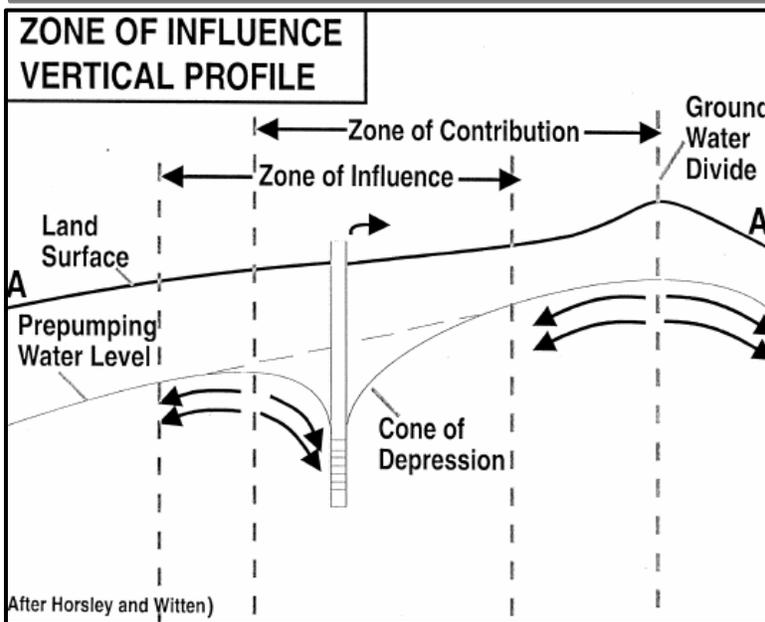
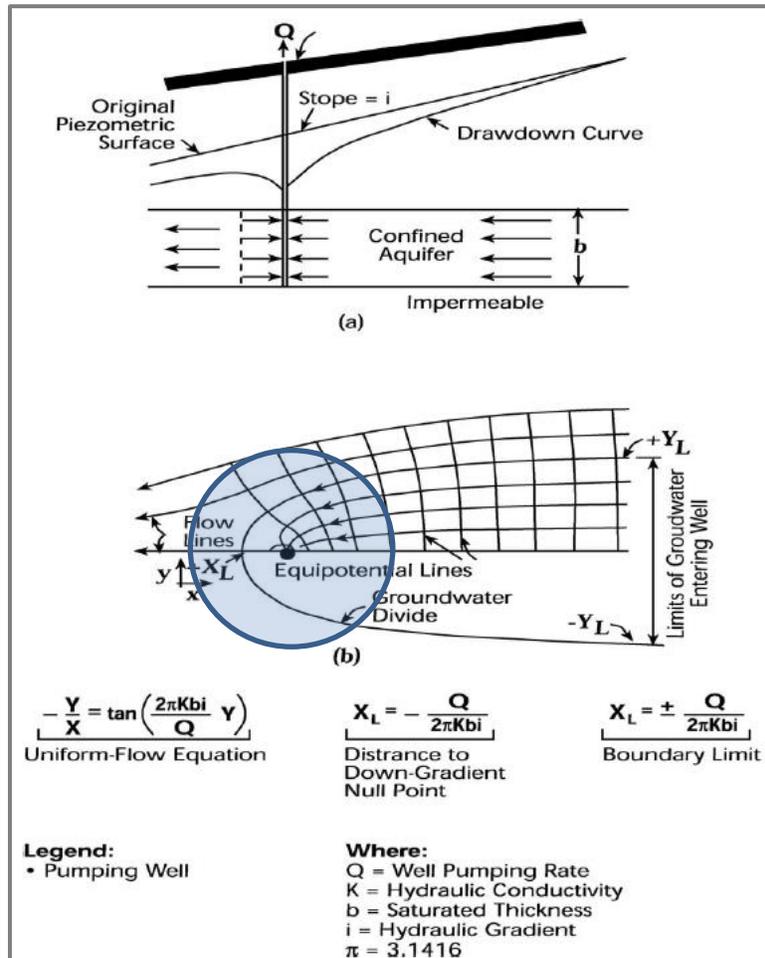
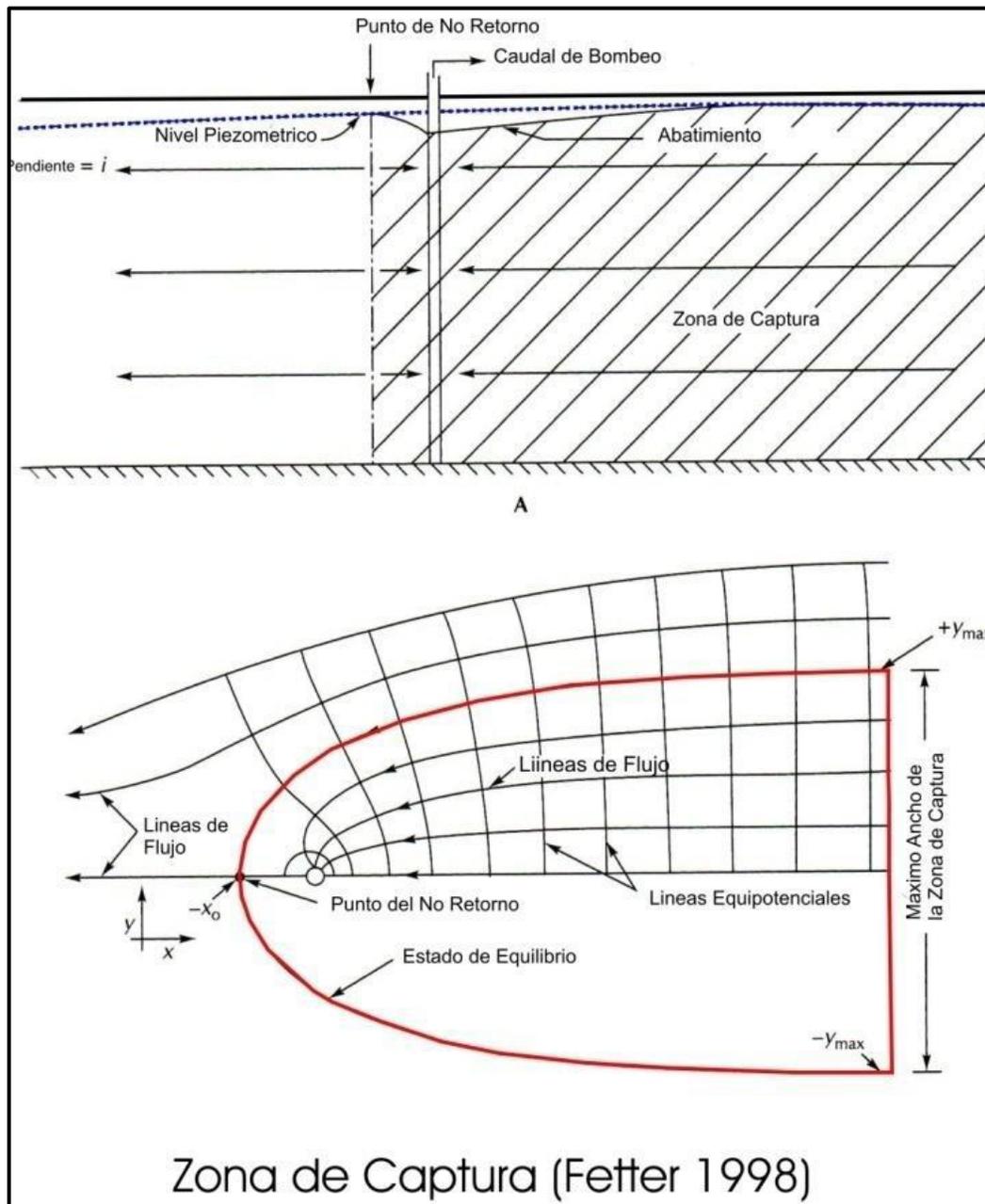


Figura 2

Esquema de la zona de captura o tubo de flujo para un pozo



### 3.3 Radio Fijo de Protección ( $R_f$ ) o Área de Protección Bacteriológica (isócronas) para pozos perforados

El área de protección bacteriológica del pozo resultante se definirá como aquella área común o área de traslape entre la zona de captura y el radio calculado por el método del Radio Fijo. Para esto el Servicio Geológico de New Jersey (Spayd & Johnson 2003)

pública una guía para la delimitación de zonas de protección de pozos el cual se basa en el régimen de bombeo del pozo usando la siguiente ecuación:

$$Rf = \sqrt{(Q * t) / (\pi * ne * b)} \text{ (ecuación 8)}$$

Donde:

- $R_f$  = radio fijo a calcular en metros.
- $n_e$  = porosidad **efectiva** del acuífero.
- $Q$  = caudal de bombeo en  $m^3/día$ .
- $b$  = espesor saturado del acuífero en metros.
- $t$  = tiempo de tránsito en días.
- $\pi = 3,14159$ .

Para la porosidad efectiva del acuífero ( $n_e$ ), principalmente en rocas sanas consolidadas puede utilizarse en la ecuación 5 los datos de referencias existentes que se aproximen a la litología del acuífero modelado. En el caso de acuíferos fisurados, el valor de la porosidad se recomienda utilizar un valor del 10%, sin embargo, se podrá utilizar otro valor que se fundamente en evaluaciones hidráulicas del acuífero o sustento bibliográfico de acuerdo con la formación geológica que conforma el acuífero o el sistema acuífero o las unidades hidrogeológicas.

Para el cálculo del radio fijo de protección ( $Rf$ ) de pozos se tiene que considerar la geometría de las zonas de captura y protección, correspondiendo a las isócronas de:

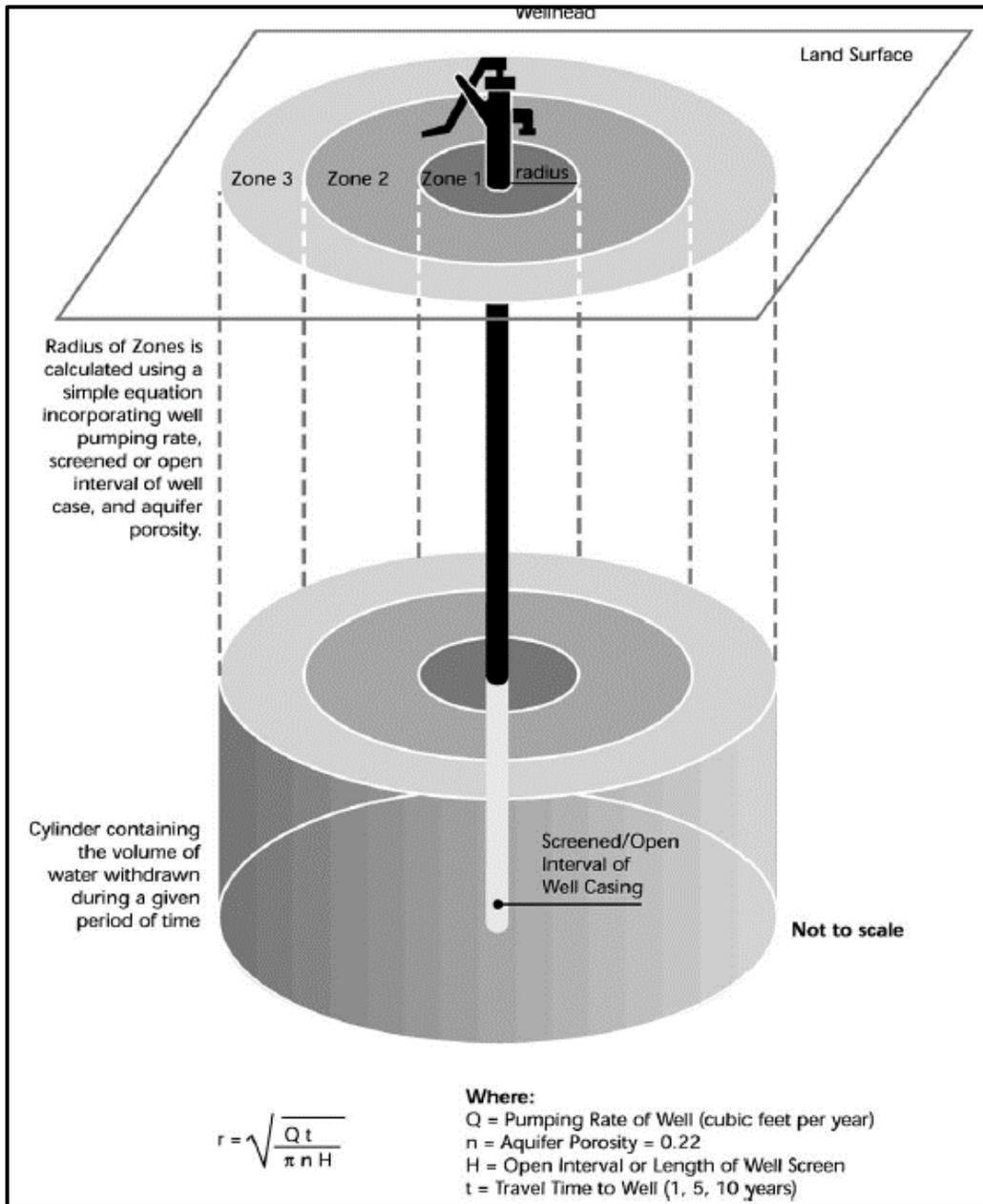
- a) Zona de protección absoluta para un tiempo de tránsito ( $t$ ) de 70 días para medios porosos. Si la zona no saturada está compuesta por materiales fracturados donde predomina el flujo fisural (permeabilidad secundaria), o una combinación de materiales **porosos y fracturados**, el tiempo de vida de las bacterias deberá considerarse como 100 días.
- b) Zona de protección regulada de acuerdo a las condiciones hidrogeológicas para un tiempo de tránsito ( $t$ ) de 5 años (1825 días).

Para este análisis se puede considerar restar el tiempo de tránsito en la zona no saturada hasta alcanzar el nivel del agua subterránea del acuífero bajo su condición más crítica, siempre y cuando se cuente con una caracterización muy detallada de la zona no saturada con su respectivo modelo hidrogeológico conceptual; esto implica que se tienen que obtener los parámetros con pruebas de campo en la totalidad de la zona no saturada con información de: textura, datos de la permeabilidad y porosidad para

cada capa de suelo y/o roca; ya sea zona meteorizada de la roca así como también en la roca sana.

**Figura 3**

Esquema del Radio Fijo de Protección o Zona de Protección Bacteriológica



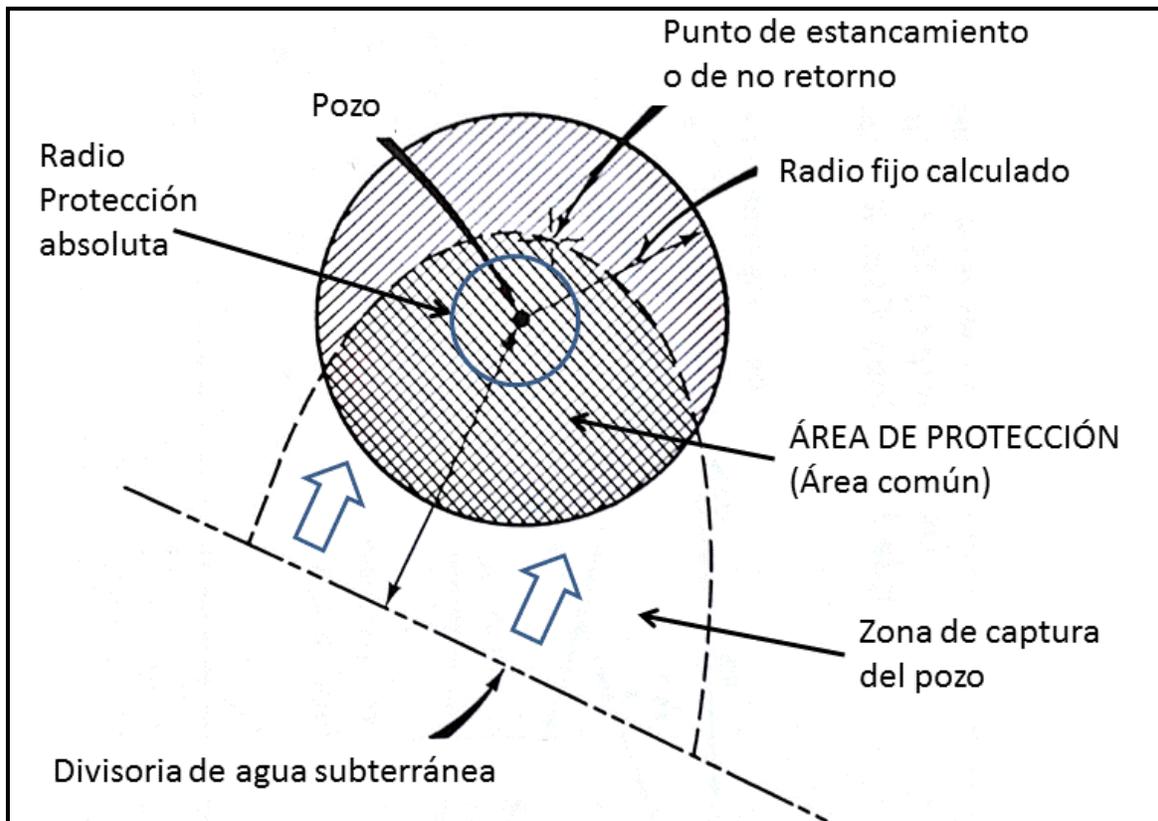
Fuente: WASHINGTON STATE WELLHEAD PROTECTION PROGRAM GUIDANCE DOCUMENT, 2010.

En la siguiente figura se muestra un esquema de una geometría de la Zona de Protección Absoluta Operacional de un pozo con los siguientes elementos:

- I. La Zona de Protección Absoluta Operacional (un polígono 30 metros por 30 metros).
- II. El cálculo de las isócronas con la metodología del radio fijo.
- III. La geometría del tubo de flujo.

**Figura 4**

Diagrama de una Zona de Protección de un Pozo utilizando el Radio Fijo y la Zona de Captura



#### 4. METODOLOGÍA DEL FLUJO UNIFORME (DETERMINACIÓN DEL TUBO DE FLUJO) EN MANANTIALES

A nivel general para los manantiales se tiene que definir la zona de captura del manantial utilizando la ecuación analítica de Darcy (curvatura ancho y distancias a lo largo de la zona saturada) como se describe en los siguientes apartados.

##### 4.1 Demarcación del área de Zona de Protección Absoluta Operacional del Manantial

Para los manantiales se tiene que resguardar una **Zona de Protección Absoluta Operacional** de 30 metros por 30 metros, inclusive esta zona de puede considerar también como una zona de **control sanitario** de mucha utilidad por parte de los entes operadores de acueductos.

##### 4.2 Cálculo del tubo de flujo para manantiales

Para el caso de los manantiales se define la zona de captura del manantial utilizando la ecuación analítica de Darcy (ancho y punto de no retorno) calculado con la fórmula para acuífero confinado (independiente del tipo de acuífero) con base en la EPA (2001) el protocolo para la delimitación de la geometría del tubo de flujo para los manantiales tiene las siguientes ecuaciones:

$$x_0 = -Q / (2 * \pi * k * b * i) \text{ (ecuación 5)}$$

$$x = -y / (\tan[\frac{2 * \pi * k * b * i}{Q}]) * y \text{ (ecuación 6)}$$

$$\pm y_{max} = \pm Q / (2 * k * b * i) \text{ (ecuación 7)}$$

En donde para las ecuaciones 5,6 y 7 tenemos que:

- $x_0$ = Punto de no retorno aguas debajo de la fuente (m).
- $x$ = Distancia a lo largo de la zona de captura (m).
- $y$  = Ancho de la zona de captura e función de  $x$  (m).
- $\pm y_{max}$ = Ancho de la zona de captura (m).
- $Q$ = Caudal de producción del manantial ( $m^3/día$ ).
- $k$ = Conductividad hidráulica del acuífero en  $m/día$ .
- $b$ = Espesor saturado del acuífero en metros.
- $i$  = Gradiente hidráulico del acuífero (adimensional).
- $\pi = 3,14159$ .

Para la construcción de la forma de la curvatura del tubo de flujo desde el manantial se aplica la ecuación 3; según la literatura a consultar al  $\pm y_{\max}$  también se le nombra como  $\pm y_L$ ; el esquema de la geometría que se obtiene del cálculo con las ecuaciones anteriores se ilustra en las figuras 5 y 6.

#### 4.3 Cálculo de Radio de Protección (Rp) para manantiales por el método de los tiempos de tránsito en la zona saturada

Para el caso de manantiales se aplicará un **Radio de Protección** fijo dentro del tubo del flujo equivalente a la distancia de 100 metros establecida en el artículo 33 de la Ley Forestal y los 200 metros especificados en el artículo 31 de la Ley de Aguas para el caso de manantiales que están captados y sean utilizados para el abastecimiento público por un ente operador.

Para este análisis se puede considerar restar el tiempo de tránsito en la zona no saturada hasta alcanzar el nivel del agua subterránea del acuífero bajo su condición más crítica, siempre y cuando se cuente con una caracterización muy detallada de la zona no saturada con su respectivo modelo hidrogeológico conceptual; esto implica que se tienen que obtener los parámetros con pruebas de campo en la totalidad de la zona no saturada con información de: textura, datos de la permeabilidad y porosidad para cada capa de suelo y/o roca; ya sea zona meteorizada de la roca así como también en la roca sana.

Una vez determinados los tiempos de tránsito en la zona no saturada, se procede a realizar el cálculo correspondiente a la zona saturada, determinando lo siguiente:

- a) Zona de protección absoluta para un tiempo de tránsito remanente (t) de 70 ó 100 días, medio poroso o fracturado respectivamente.
- b) Zona de protección regulada para un tiempo de tránsito remanente (t) de 5 años, (1825 días).

Para calcular la distancia o radio de protección por medio de las isócronas se utiliza la ecuación del tiempo de tránsito en la zona saturada:

$$T = \frac{d*n}{k*i} \text{ (ecuación 6)}$$

En donde:

- T = tiempo de tránsito en días en la zona saturada del acuífero.
- d = distancia en metros de la isócrona a calcular.
- n= porosidad eficaz del acuífero (%).

- $k$  = conductividad hidráulica del acuífero en metros por día.
- $i$  = gradiente hidráulico (adimensional).

De esta manera, en la fórmula anterior se puede despejar la distancia ( $d$ ) para realizar el cálculo para las isócronas o tiempos de tránsito ( $T$ ) para la zona saturada, según corresponda:

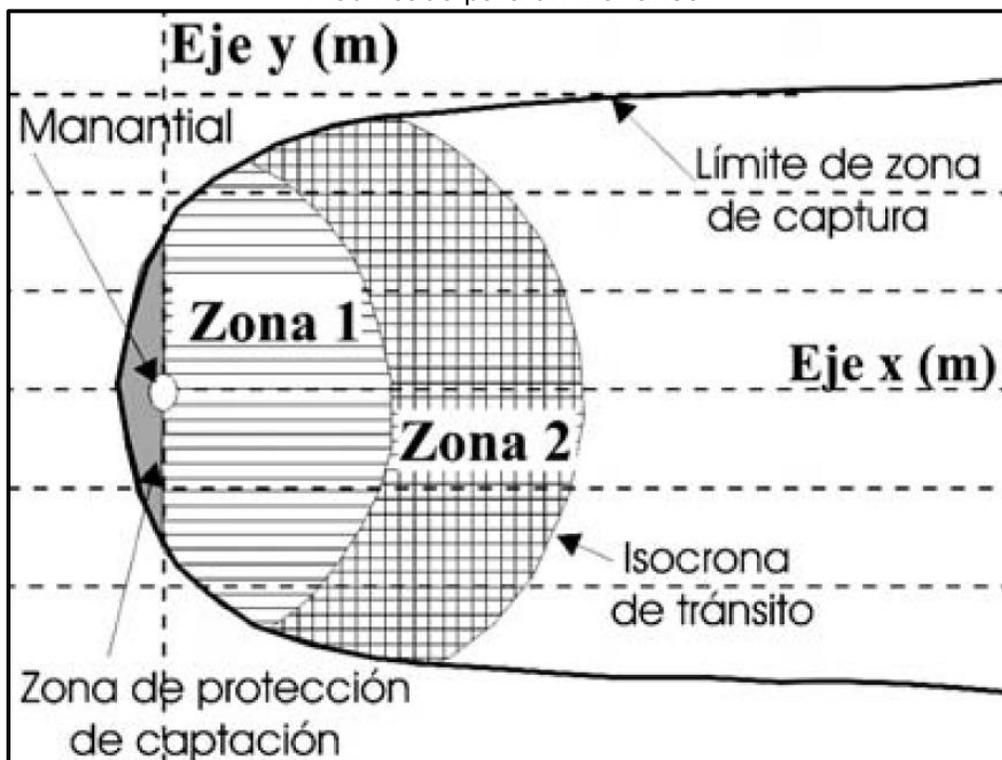
$$d \text{ o } Rp = \frac{T * k * i}{n}$$

Si el valor calculado para la  $d$  es menor de 100 o 200 metros para el caso de manantiales no captados o captados para uso poblacional respectivamente; dentro de la geometría del tubo de flujo se deben de respetar los 100 o 200 metros; si el valor obtenido para del  $Rp$  es mayor la zona de protección se define con los valores obtenidos.

Por lo tanto, se recalca que la distancia o radio calculado con la isócrona de 70 o 100 días y la isócrona de 1825 días no podrán ser menores a los 100 metros o 200 según se deba aplicar el artículo 33 de la Ley Forestal y el artículo 31 de la Ley de Aguas. En las siguientes figuras se tiene un ejemplo de una zona de protección para un manantial:

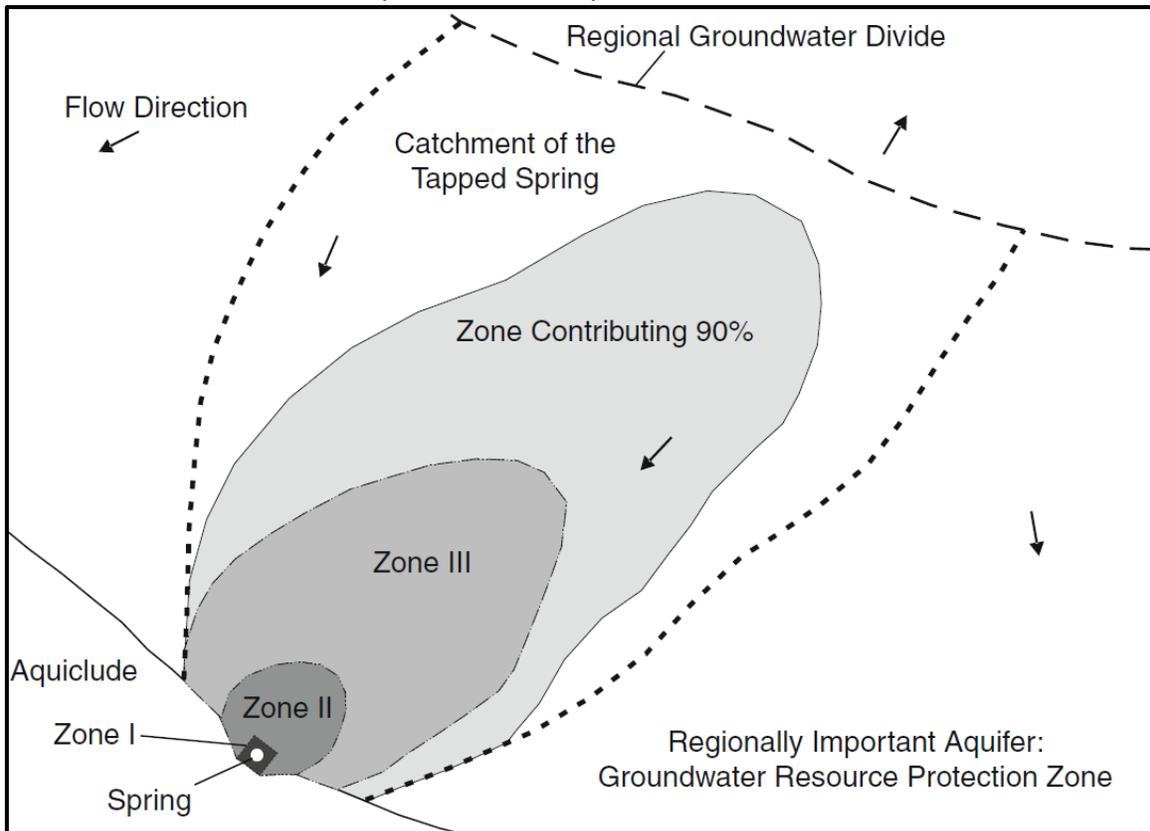
**Figura 5.**

Zona de captura diseñada con el método matemático analítico modificado para un manantial



Fuente: Vargas, 2002.

**Figura 6.**  
Zona de captura el método matemático analítico y  
tiempos de tránsito para un manantial



Fuente: Kresic y Stevanovich, 2010

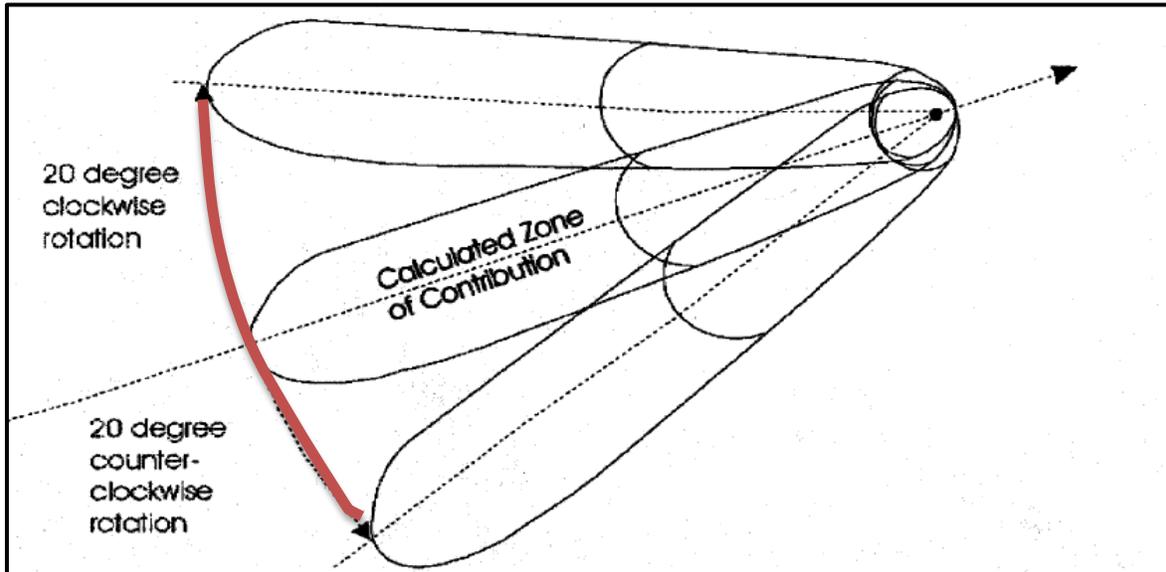
## 5. VARIACIÓN DEL MÉTODO FLUJO UNIFORME PARA ACUÍFEROS (MEDIOS) FRACTURADOS

Para acuíferos o medios fracturados se deben definir las zonas de protección con las metodologías explicadas en los apartados anteriores y posteriormente rotar 20 grados el eje del flujo, a ambos lados de la zona delimitada y combinar estas áreas en una sola, tal y como se ilustra en la figuras 7 y 8.

Este método aplica tanto para **pozos** como para **manantiales** y se basa en la combinación de los radios de protección y la ecuación analítica de flujo uniforme subterráneo explicadas anteriormente, según la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA). Esta consideración se basa en que la ecuación del método de flujo uniforme se realiza para acuíferos homogéneos, este método combinado introduce cambios que se consideran aceptables para medios fracturados con cierta homogeneidad y discontinuidad en el sistema de las fracturas.

Figura 7

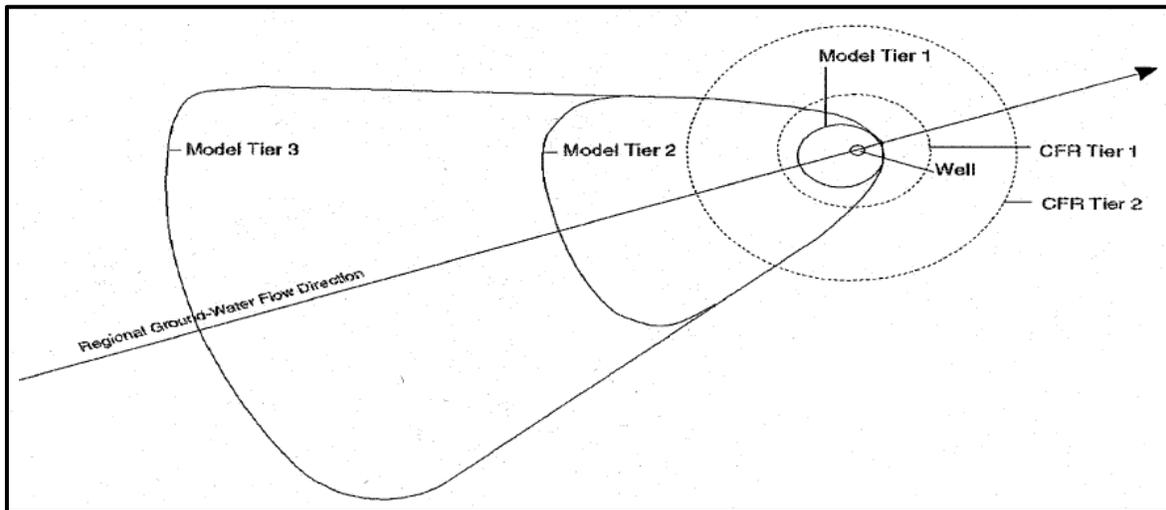
Diagrama de la rotación del eje del flujo de Aguas Subterráneas



Fuente: Spayd & Jonson, 2003.

Figura 8

Delimitación de las zonas de protección



Fuente: Spayd y Jonson, 2003.

## 6. REFERENCIAS

Kresic, N. y Stevanovic, Z. (2010). *Groundwater hydrology of springs*. Elsevier Inc.

Russell, J. (1994). *Handbook Ground Water and Wellhead Protection*. EPA/625/R-94-001.

Spayd S.E., y Johnson, S.W. (2003). *Guidelines for delineation of wellhead protection areas in New Jersey*, New Jersey Department of Environmental Protection, New Jersey Geological Survey, Trenton.

Vargas, A. (2002). Manantiales de una parte del Valle Central de Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 27. 39-52.