

Estimación de la subsidencia en el área del cuenco vertedor del proyecto hidroeléctrico angostura

Rodrigo Alberto Calvo Porras ¹
Asdrúbal G. Vargas ²

En este trabajo se investiga la subsidencia de suelos producto del abatimiento intencional prolongado del nivel piezométrico de los acuíferos que subyacen la estructura del cuenco vertedor del P.H. Angostura.

Palabras clave

Subsidencia, acuíferos confinados, P.H. Angostura, Hidrogeología tropical

Resumen

En este trabajo se investiga la subsidencia de suelos producto del abatimiento intencional prolongado del nivel piezométrico de los acuíferos que subyacen la estructura del cuenco vertedor del P.H. Angostura.

Para poder analizar la ocurrencia de la subsidencia de suelos y estimar su magnitud fue necesario reformular el modelo conceptual de los acuíferos del área. Esto se logró por medio del uso de perfiles geofísicos, y de la información brindada por estudios técnicos, desarrollados durante la etapa de construcción del proyecto. A partir de los datos recopilados e integrados, se determinó que en el área de estudio

existen cuatro unidades acuíferas, siendo el de mayor interés e importancia el denominado acuífero inferior con una extensión de 8,5 km², el resto de las formaciones acuíferas se circunscriben a un área de aproximadamente 3 km², que abarcan el sitio de presa y el vertedor. Desde el punto de vista geológico, el área de estudio se caracteriza por tener como basamento a la formación Doán la cual sirve de piso a las formaciones acuíferas del área. Esta formación es sobreyacida por un paleocauce del río Reventazón, el cual alberga el acuífero inferior. Este paleocauce fue sepultado por avalanchas de tipo volcánico constituido principalmente por brechas que funcionan como acuitardo de las capas acuíferas.

Por medio del análisis teórico, se estimó que ocurriría una subsidencia. Se calculó que por descompresión de la capa acuífera la subsidencia sería de 10,1 milímetros en el área del cuenco

1 Ingeniero, topógrafo, geógrafo e hidrogeólogo, Área de auscultación de obras, ICE. Correo electrónico: (rcalvop@ice.go.cr).

2 Geólogo, hidrogeólogo, Área de perforación, inyección y servicios conexos, ICE. Correo electrónico: (avargasS@ice.go.cr).

La zona de estudio se localiza en el área de embalse y de la estructura del cuenco vertedero principal del Proyecto Hidroeléctrico Angostura.

vertedor. La subsidencia por aporte o descompresión de los acuitardos se estimó en 8,5 milímetros, dando como resultado una subsidencia total del orden de los 18,6 milímetros en el área de mayor descompresión.

Los controles de nivelación de la superficie del terreno determinaron que el área del vertedor sufrió un proceso de levantamiento, con magnitudes del orden de los 12 milímetros, asociado al período en que se realizaron las excavaciones que alojarían las estructuras principales. Este proceso de expansión del área se detuvo cuando finalizó la construcción del vertedor y entró en operación. El peso de la estructura del vertedor sumado al peso de la carga de agua que contenía al iniciar su funcionamiento, sustituyeron el material retirado, dando origen a un proceso de consolidación que llevó el área a su posición original. A partir de este momento, en el año de 1999 se inició un proceso de subsidencia, con magnitudes de hasta 21 milímetros, el cual finalizó en los últimos meses del año 2000, período desde el cual el área se mantiene estable. Las magnitudes de la subsidencia calculada por métodos teóricos de 18 milímetros y la registrada en el sitio a partir de los controles alimétricos con magnitudes de 21 milímetros, son muy similares y no representan un factor de riesgo para la estructura del vertedor principal.

Introducción

La zona de estudio se localiza en el área de embalse y de la estructura del cuenco vertedero principal del Proyecto Hidroeléctrico Angostura. Entre las coordenadas planas de la proyección Lambert, 203.000 a 207.000 de latitud norte y 571.000 a 577.000 de longitud oeste, de la hoja topográfica Tucurrique del Instituto Geográfico Nacional, a escala 1:50.000 (Fig. 1).

El Proyecto Angostura se ubica en la cuenca media del río Reventazón, en la provincia de Cartago, 2 km al sureste de la ciudad de Turrialba. Este utiliza las aguas de los ríos Reventazón, Turrialba y Tuis para la producción de 180 MW, con lo que se convierte en el proyecto de mayor producción a nivel individual del país. Geomorfológicamente, el área se caracteriza por ser un valle de tipo aluvional. Presenta una elevación promedio de 580 m.s.n.m. En este sector, el río Reventazón corre en dirección este hasta la confluencia con el río Atirro, cambiando, a partir de este punto, a una dirección norte hasta su confluencia con el río Turrialba.

Algunos autores se refieren al sitio como el sector de confluencias múltiples, dado que ahí convergen los ríos Reventazón, Pejibaye, Atirro y Tuis y le otorgan características de cuenca de terrazas fluviales (Bergoing, 1998). El área es una zona predominantemente agrícola, dedicada al cultivo de caña de azúcar en las áreas planas y café en las zonas de mayor pendiente. Presenta las siguientes características climatológicas: precipitación promedio de 3412 mm, temperatura promedio de 21,7 °C y humedad relativa de 87%.

El Instituto Costarricense de Electricidad inició los estudios del Proyecto Hidroeléctrico Angostura desde la década de los setentas en el siglo XX, y las primeras publicaciones formales de estudios geológicos se remontan al año de 1969. El Proyecto Hidroeléctrico Angostura entró en operación en el mes de diciembre del año 2000, y es una de las mayores obras de ingeniería construidas en el país.

Las aguas del río Reventazón son embalsadas, en conjunto con los aportes de 20 m³ de los ríos Turrialba y Tuis, por una presa de enrocamiento de 36 metros de alto, y 220 metros de largo. Las obras de excedencias están constituidas por un vertedor principal de tipo frontal y un vertedor secundario

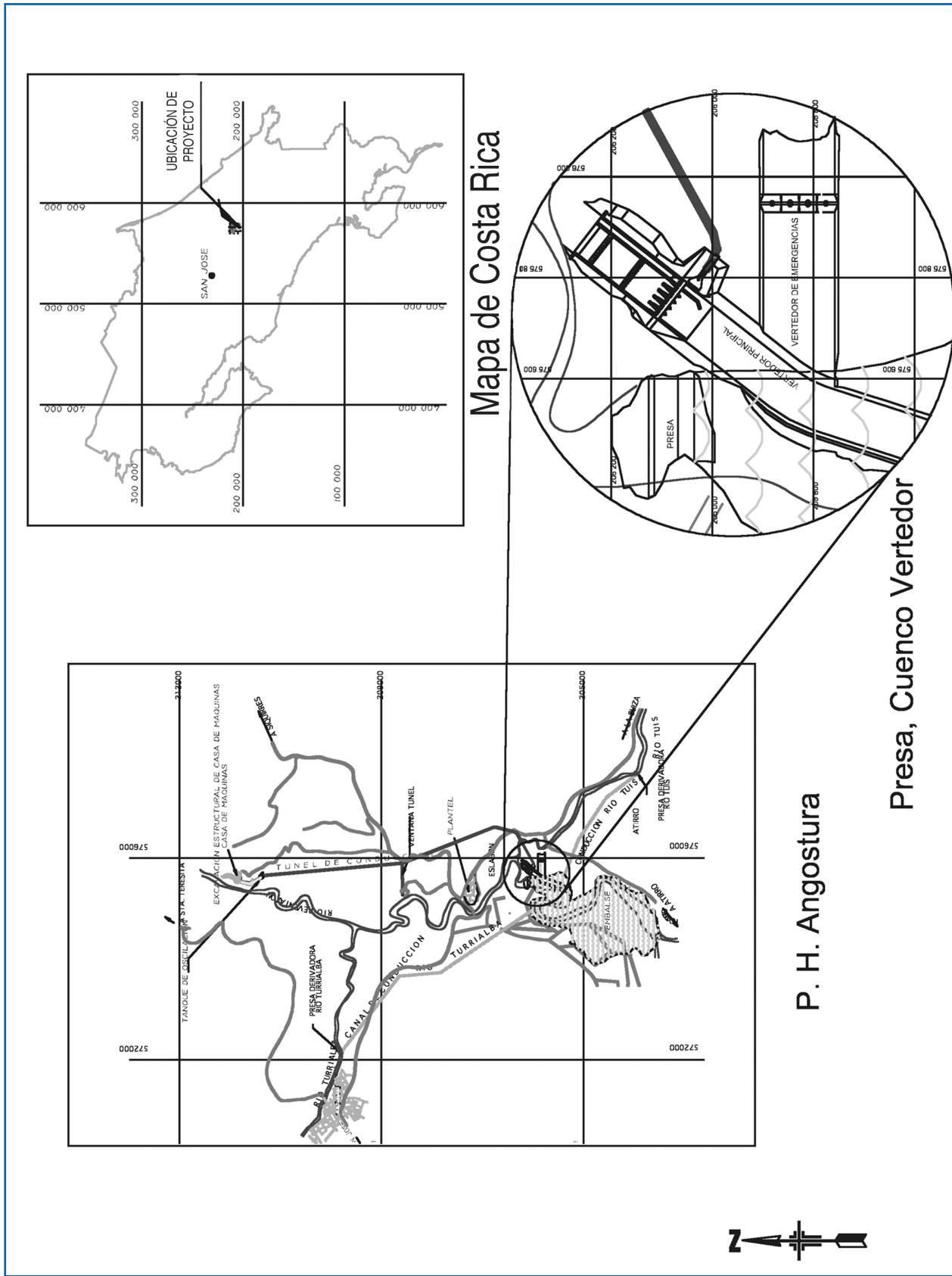


Figura 1

Ubicación de la zona de estudio.

de emergencias, que cuenta con un mecanismo de dique fusible para el control de avenidas máximas.

Debido a la complejidad de las obras civiles, dentro de las cuales destaca el túnel de conducción de más de 8 km de largo y las estructuras vertedoras, con una capacidad de evacuar avenidas de hasta 8000 m³/s, se requería de un estudio detallado de las condiciones geológicas de toda el área del proyecto.

En conjunto con estudios de geofísica, se inicia a partir de 1979 el proceso de perforación de los primeros pozos exploratorios; así, cuando las primeras etapas de investigación finalizaron, ya se habían efectuado aproximadamente 80 perforaciones, distribuidas en la zona de embalse a la presa.

A partir de la información brindada por los primeros estudios geológicos y geofísicos, se determinó que subyaciendo el área donde se construirían la presa y las estructura del cuenco vertedor de excedencias, existía un sistema de acuíferos confinados que por la magnitud de las presiones piezohidrodinámicas que presentaban, podrían afectar directamente la fundación del vertedor principal. Estos acuíferos fueron definidos geológicamente por primera vez, en 1986, por los geólogos del ICE, y localizados en los depósitos aluvionales del área (Alvarado & Leandro, 1997).

Al aproximarse la fase de construcción del proyecto, se requería detallar las características hidrogeológicas de estos acuíferos, por lo que a partir del primer semestre de 1991 se realizaron 23 perforaciones adicionales en el sitio de presa y en el área del vertedor para complementar los estudios de la hidrogeología de esta área. Estas perforaciones incluyeron la construcción de pozos para la realización de pruebas de bombeo, mediante los cuales fue posible determinar los parámetros hidrogeológicos del acuífero principal.

Con la información recopilada en este período, se realizaron, por parte del Departamento de Geotecnia del ICE, análisis de esfuerzos de la fundación del vertedor del P. H. Angostura (Laporte, 1990, 1994 y 1997). En ellos se determinó, la necesidad de abatir los niveles piezométricos de los acuíferos hasta cotas consideradas como seguras para las estructuras.

Losilla (1995) realizó estudios en el área del cuenco vertedor del proyecto, con la finalidad de diseñar un campo de pozos de alivio que propiciara el descenso de los niveles piezométricos de los acuíferos a cotas consideradas como seguras para la realización de las excavaciones, y posterior funcionamiento del vertedor. En estos estudios, se expone que la subsidencia podría ser un efecto colateral que se originaría como consecuencia de un abatimiento drástico y prolongado de los niveles piezométricos. Además, propone que se debe mantener un control permanente de la elevación de la superficie del terreno, para determinar cualquier indicio de subsidencia con suficiente anticipación, y contrarrestarlo con la elevación de la superficie piezométrica por medio de manipulación de caudales.

Las recomendaciones se tomaron en consideración y a partir de 1995 se inicia un proceso de monitoreo, utilizando nivelaciones topográficas de alta precisión de la superficie del terreno circundante al vertedor, para dar seguimiento a los posibles cambios en la superficie del terreno. Estos controles se realizaron hasta 1998 cuando la construcción del vertedor terminó y se volvieron a retomar a partir del año 2000.

Los estudios geológicos, realizados por el Instituto Costarricense de Electricidad en el área de construcción del Proyecto Hidroeléctrico Angostura, determinaron la existencia de un sistema de acuíferos artesianos de origen aluvional, que

Al aproximarse la fase de construcción del proyecto, se requería detallar las características hidrogeológicas de estos acuíferos, por lo que a partir del primer semestre de 1991 se realizaron 23 perforaciones adicionales en el sitio de presa y en el área del vertedor para complementar los estudios de la hidrogeología de esta área.

Los parámetros de manejo para el sistema de acuíferos establecen que estos se deberán mantener abatidos durante todo el período de vida útil del proyecto.

subyacen las estructuras de la presa y del cuenco vertedor de excedencias. El más importante de los acuíferos tiene un nivel piezométrico el cual alcanza la cota 577 m.s.n.m., que en el área del cuenco vertedor representa uno 22 metros sobre el nivel del suelo.

La construcción de las obras de presa y cuenco vertedor requería de la realización de excavaciones, de volúmenes importantes, de la capa confinante (acuitardo), reduciendo de esta forma el espesor de esta y originando la posibilidad de que se produjera una ruptura del techo del acuífero. Esto, motivado por diferencia entre las fuerzas de presión del acuífero, sobre su techo impermeable y el peso de esta capa que se reduciría por la excavación (ICE, 1997).

Para minimizar las posibilidades de ruptura del techo del acuífero, por la extracción de material, se decidió que los acuíferos deberían ser abatidos hasta alcanzar niveles potenciométricos considerados seguros (cota 558,00 m.s.n.m) para la realización de las excavaciones (Fig. 2). El abatimiento de los niveles se logró con la construcción de una batería de seis pozos de los cuales brota agua en forma artesiana, con un caudal total de 180,0 lts/s. Este caudal de extracción ha hecho descender el nivel piezométrico hasta la cota 558,00 m.s.n.m. que está considerado dentro de los márgenes de seguridad.

Los parámetros de manejo para el sistema de acuíferos establecen que estos se deberán mantener abatidos durante todo el período de vida útil del proyecto, lo cual implica una disminución prolongada e intensiva de los niveles piezométricos, que conduciría a la subsidencia de los terrenos, ocurriendo en el área sobre la que se ubican las principales obras del proyecto. Su análisis se convierte en un factor de suma importancia, para determinar si, de presentarse esta situación y según su magnitud, está se

convertirá en un factor de riesgo para las estructuras.

Por lo mencionado anteriormente, se planteó como objetivos específicos investigar la subsidencia por abatimiento de niveles piezométricos en el área del vertedor principal y cuantificar la magnitud de la subsidencia que se produciría.

Análisis de subsidencia

Desde el punto de vista hidrogeológico, la subsidencia de suelos es un fenómeno que se asocia únicamente a la sobreexplotación de acuíferos de tipo confinado. En áreas de explotación de acuíferos libres no se ha observado subsidencia, ni siquiera, con la utilización de nivelaciones de alta precisión (Vázquez & Alpañes, 1999).

Existen dos mecanismos desencadenantes de la subsidencia cuando se explotan acuíferos confinados, estos son:

- I. El exceso de bombeo provoca una disminución en los niveles piezométricos y, consecuentemente, se da una reducción en la presión hidrostática entre los poros de la matriz del acuífero, lo cual induce a un aumento del esfuerzo efectivo y un aumento de la sobrecarga de las capas sobreyacentes del acuífero.
- II. La reducción en el contenido de humedad en las arcillas del acuitardo que produce una reducción en su volumen.

El primero está asociado a la compactación que se produce en las capas acuíferas y el segundo que se origina por la compactación inelástica de las capas confinantes (acuitardos).

Custodio & Llamas (1983) definen el primer caso como una deformación de tipo elástico que tiene lugar normalmente con mucha rapidez; esto implica que no es necesario estimar el período de ocurrencia. El segundo caso

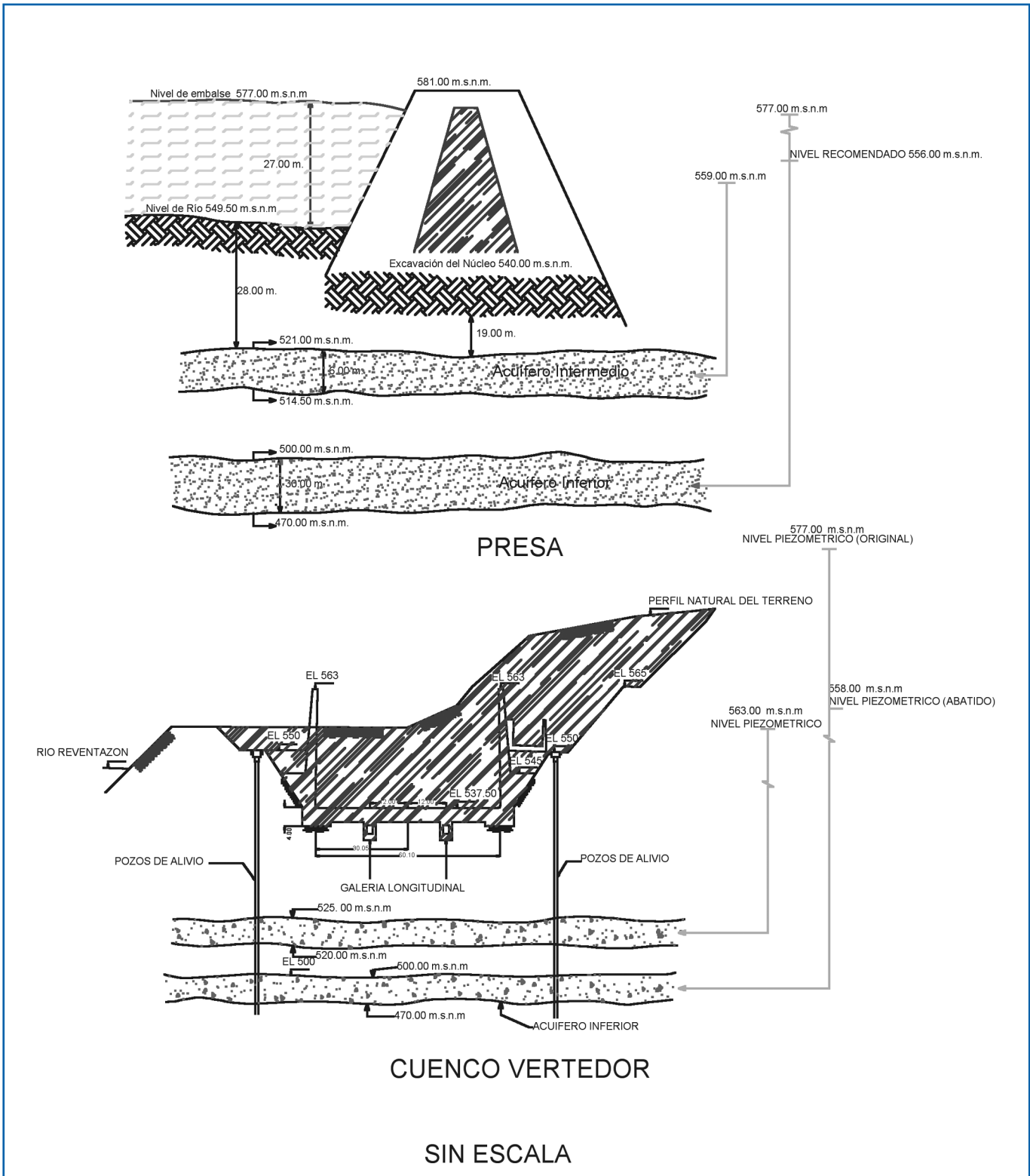


Figura 2
 Perfil esquemático de los acuíferos en el área de la presa y del vertedor.

está asociado, generalmente, a la compactación de materiales de grano fino como arcillas y limos, los cuales tienen permeabilidades sumamente bajas (solo unos pocos mili-darcys o menores) lo que implica que su proceso de drenado, sea extremadamente lento; por lo cual es necesario calcular su período de asentamiento máximo.

Freeze and Cherry (1988) proponen que en un sistema de acuíferos múltiples con varios pozos de bombeo, la subsidencia total, sería la sumatoria de la compactación de las capas acuíferas y confinantes. La consideración anterior implica, en este caso del P.H. Angostura, la necesidad de calcular la magnitud de la subsidencia en ambas capas.

Cálculo de subsidencia por compactación del acuífero

Para determinar la magnitud de la subsidencia por compactación de la capa acuífera, se utilizará la relación entre la disminución de los niveles piezométricos de acuíferos confinados y la subsidencia de terrenos, la cual fue descrita por Lohman (1972). Este autor propuso, basándose en la ley de Hook, (los cuerpos elásticos pueden cambiar su dimensión hasta un límite llamado límite de proporcionalidad), que una parte de la subsidencia de terrenos, originada por abatimiento de acuíferos confinados, se da por compactación del acuífero y está en función de la cantidad de agua que sea capaz de ceder el estrato acuífero. Lohman llama a esta subsidencia de tipo elástico, dado que una recuperación o aumento en los niveles piezométricos se traduce en una recuperación de los niveles del suelo.

Lohman propone que:

$$\Delta m = \Delta p * \left(\left(\frac{S}{\lambda} \right) - m * n * \beta \right)$$

Donde:

- Δm Subsidencia en metros (compactación del acuífero) (m)
- Δp Disminución de la carga piezométrica (kg/cm²)
- S Coeficiente de almacenamiento (-)
- λ Peso específico del agua por unidad de área (kg/cm²)
- m Espesor medio del acuífero (m)
- n Porosidad del acuífero (-)
- β Recíproco del módulo de elasticidad del agua (cm²/kg)

Los parámetros para el cálculo de la subsidencia, según las características del acuífero inferior son los siguientes: el nivel piezométrico se abatió en forma intencional de la cota 577,00 msnm a la cota 558,00 msnm; esto implica una reducción de 19 metros en los niveles potenciométricos de la carga de los acuíferos. La máxima reducción de la presión se da en la boca de los pozos de alivio.

El coeficiente de almacenamiento se determinó por medio de pruebas de bombeo, con un valor de 0,00058 y la porosidad del acuífero se estimó en un 35% (Losilla, 1995). La perforación de los pozos de alivio permitió definir que el acuífero no tiene un espesor constante; en tan solo 90 metros de distancia en entre un pozo y otro, el espesor varia hasta en 10 metros. El espesor utilizado para el cálculo de subsidencia fue el de mayor magnitud encontrado en la perforación de los pozos, este es de 28,6 m.

€

El valor del peso específico del agua es de 0,1 kg/cm²m y el valor del recíproco del módulo de elasticidad del agua es de 4,7x10⁻⁵ cm²/kg. Por lo tanto, la fórmula queda de la siguiente forma:

Δm	Subsidencia en metros
$\Delta p = 1,9 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$	Disminución de la carga piezométrica
$S = 5,8 \times 10^{-4}$	Coefficiente de almacenamiento
$\lambda = 0,1 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$	Peso específico del agua por unidad de área
$m = 28,6$	Espesor del acuífero en metros
$n = 35\%$	Porosidad del acuífero
$\beta = 4,7 \times 10^{-5} \frac{\text{cm}^2}{\text{kg}}$	Recíproco del módulo de elasticidad del agua

$$\Delta m = 1,9 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \left(\left(\frac{5,8 \times 10^{-4}}{0,1 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}} - 0,35 * 28,6 m * 4,7 \times 10^{-5} \frac{\text{cm}^2}{\text{kg}} \right) \right)$$

Dando como resultado una posible subsidencia de 0,01 m en el área de mayor descompresión del acuífero.

Cálculo de subsidencia por compactación del acuitardo

Estando una parte del volumen de subsidencia en función del fluido removido de las capas confinantes, y siendo estas como lo establece Jacob, las capas que a partir de su compresión, son las mayores aportadoras de fluido en los acuíferos confinados, es de esperar que las mayores magnitudes de subsidencia se den por el aporte de fluido de estas capas (Domenico & Schwartz, 1997).

El parámetro hidrogeológico mediante el cual es posible conocer el volumen que son capaces de ceder las capas acuíferas y confinantes ante una variación de la carga hidráulica, se conoce como coeficiente de almacenamiento.

La determinación del coeficiente de almacenamiento se realizará utilizando el postulado establecido por Lohman (1972), donde:

$$s = m * n * \gamma * \left(\beta + \frac{1}{n * E_s} \right)$$

Donde

s = Coeficiente de almacenamiento de la capa confinante

m = Espesor medio del acuitardo (m)

n = Porosidad del acuitardo (-)

λ = Peso específico del agua por unidad de área N/m³

β = Recíproco del módulo de elasticidad del agua (m²/n)

E_s = Módulo de elasticidad del acuitardo (kg/cm²)

Los estudios geotécnicos clasificaron la capa confinante como un tipo de suelo de clasificación **ML** (Avilés & Kauffman, 1995). La porosidad para este tipo de suelos es de **38%** y la conductividad hidráulica estimada es de **5,7 x 10⁻⁷ cm/s**. El módulo de elasticidad de la capa confinante se determinó en laboratorio con un valor de **5300 kg/cm²** (Laporte, 1997). El espesor medio del acuitardo en el área del cuenco vertedor es de **25 metros** y los valores del recíproco del módulo de elasticidad del agua es de **4,80 x⁻¹⁰ m²/N**.

€

Quedando la fórmula de la siguiente forma:

$$s = 25m * 0,38 * 9810 \frac{N}{m^3} * \left(4,80e^{-10} \frac{m^2}{N} \frac{1}{0,38 * 51,99e^7 \frac{N}{m^2}} \right)$$

Dando como resultado un coeficiente de almacenamiento de **5,16 E-4** y un coeficiente de almacenamiento específico del acuitardo de **2,07 E - 5**.

Teniendo el valor del coeficiente de almacenamiento, se puede proceder a calcular la magnitud de la subsidencia que se dará por aporte de agua del acuitardo. Domenico and Schwartz (1997) establecen que para un sistema de acuíferos múltiples de tipo confinado, la subsidencia que se producirá por compactación de la capa confinante ante una reducción de los niveles piezométricos en ambos acuíferos es igual a:

$$q = S_s * H * \left(\frac{\Delta h_1 + \Delta h_2}{2} \right)$$

Donde

q = Volumen de fluido removido, igual al volumen de subsidencia

S_s = Coeficiente de almacenamiento específico de acuitardo

H = Espesor de capa confinante (m)

Δh_1 = Reducción de nivel piezométrico en acuífero 1 (m)

Δh_2 = Reducción de nivel piezométrico en acuífero 2 (m)

Las descensos en los niveles piezométricos, por el abatimiento intencional fueron, en el acuífero inferior, de 19 metros, el nivel paso de la cota, 577,00 msnm a la cota 558,00 msnm y para el acuífero intermedio el

descenso fue de 9 metros, la cota paso de 564,00 msnm, a la cota 551,00 msnm para un descenso de 14,00 metros. El espesor del acuitardo se había definido en 25,00 metros

De esta manera, la fórmula es:

$$q = 2,07 \times 10^{-5} * 25m * \left(\frac{14m + 19m}{2} \right)$$

Donde:

Volumen de fluido removido, igual al volumen de subsidencia.

Coeficiente de almacenamiento específico de acuitardo **2,07x10⁻⁵**

Espesor de capa confinante **25 m**

Reducción de nivel piezométrico en acuífero **I: 14 m**

Reducción de nivel piezométrico en acuífero **II: 19 metros**

Ello da como resultado una posible subsidencia de suelos de una magnitud de **0,0085 m** por cambio de volumen en el acuitardo. Habiendo estimado la subsidencia por descompresión del acuitardo, en 0,01 m y la subsidencia por descompresión de la capa confinante en 0,0085 m, es de esperar que la **subsidencia total para la zona de mayores abatimientos sea de 0,019 m**.

Control de la superficie del terreno en el área de estudio

Según lo establecen Domenico y Schwartz (1997), comprobar el desarrollo de un proceso de subsidencia de suelo solo es posible gracias a un control topográfico continuo de nivelación de alta precisión. Por lo tanto, los controles topográficos de nivelación, en diferentes épocas, son la herramienta fundamental para poder determinar el comportamiento

evolutivo de la superficie del suelo y, por lo tanto, la existencia de asentamientos.

Dado que con anterioridad al inicio de los movimientos de tierra y a la perforación de los pozos de alivio, se advirtió de la posibilidad de que se diera algún grado de subsidencia (Losilla, 1995), se implementaron en el área del vertedor, desde 1995, tres sistemas de monitoreo para determinar cambios en la superficie del terreno y verificar la estabilidad de los taludes de las excavaciones.

Los controles consistieron en los monitoreos altimétricos de bancos de nivel en el área circundante al cuenco vertedor, el monitoreo planimétrico de monumentos de control en alrededores del cuenco vertedor y el monitoreo de bancos de nivel profundo en el área del cuenco.

Control altimétrico de bancos de nivel

Los controles por nivelación topográfica de alta precisión se iniciaron a finales de 1995, justo en los inicios de la excavación de la fundación. Para esa época se implementaron 24 puntos de control distribuidos en los alrededores del vertedor, que tenían como finalidad verificar la estabilidad de los taludes de las excavaciones y monitorear los posibles asentamientos que se presentaran en el área. La ubicación de estos puntos de control se aprecia en la figura 3.

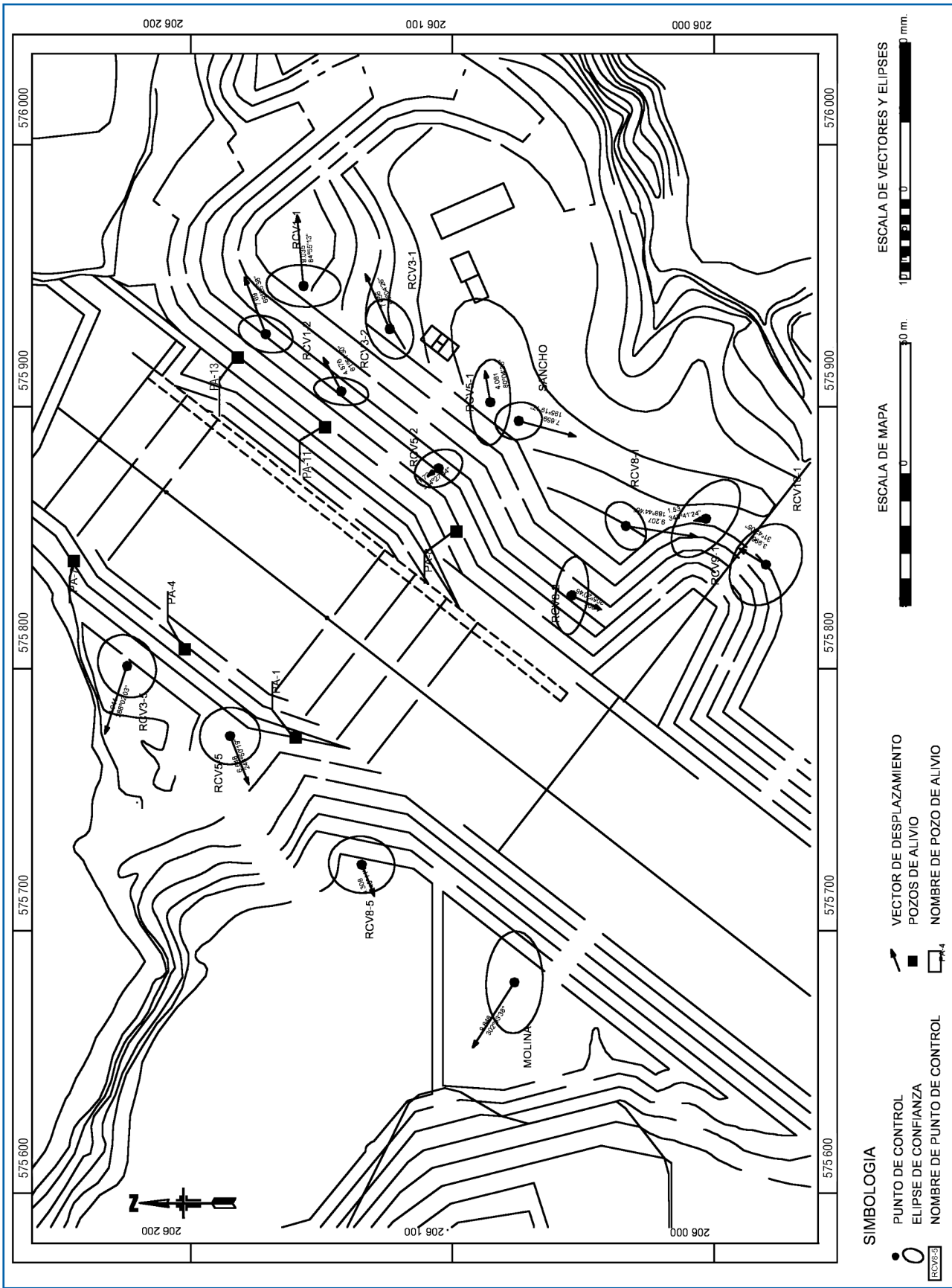
Desde noviembre de 1995 y hasta agosto de 1998, las nivelaciones y los controles de la superficie del terreno las efectuó el área de topografía del proyecto. Los controles se suspendieron en 1998 cuando se finalizaron las excavaciones y se inicia el proceso constructivo del vertedor principal. Los controles se reinician en el año 2000 como parte de los procesos de control de estructuras del proyecto.

Dado que durante el período de las excavaciones y la construcción, varios de los monumentos fueron destruidos accidentalmente, los controles se reiniciaron en noviembre del 2000, utilizando únicamente *siete* monumentos existentes (cuadro 1).

De los datos obtenidos a través de las nivelaciones de tipo diferencial, se interpreta que el área del vertedor sufrió un proceso de levantamiento hasta mediados de 1998, cuyas mayores magnitudes fueron del orden de los 12 mm, este proceso finalizó cuando se inició la construcción del vertedor y este entra en operación. La carga que ejerció la estructura colocada, sumado al peso del agua que el vertedor puede contener al entrar en operación, sustituyeron al material extraído durante las excavaciones, lo cual da origen a un proceso de asentamiento que llevó el área a su posición original (Fig. 4).

El fenómeno puede tener su origen en que el estado de equilibrio de los diferentes estratos del área es modificado por la eliminación de un volumen considerable de material. La eliminación de las capas superiores por la excavación sometió la zona a una carga inferior a la presión a la cual se consolidó totalmente, teniendo que alcanzar un nuevo estado de equilibrio por la diferencia de esfuerzos. En la zona del vertedor fueron retirados un millón trescientos treinta y dos mil setecientos cuarenta y dos metros cúbicos de material (ICE, 1997).

La tendencia posterior de asentamiento puede estar relacionada con la colocación de la estructura del vertedor, que sustituye el material extraído, iniciándose un nuevo proceso de equiparación de esfuerzos. Dado que el inicio del abatimiento de los acuíferos coincidió con el comienzo de las excavaciones, la subsidencia, que según los cálculos teóricos debió de alcanzar



Ubicación de los puntos de control de subsidencia en el área del cuenco. **Figura 3**

Cuadro 1

Punto	Diferencia entre épocas de medición															
	1 Nov-95	2 Feb-96	3 May-98	4 Ago-98	5 Nov-00	6 May-01	7 Dic-01	1/2	1/3	1/4	2/3	2/4	3/4	1/5	1/6	1/7
BN16-A	582,818	582,821	582,818	582,818	582,813	582,812		3	0	0	-3	-3	0	-5	-6	-582818
BN-16	582,181	582,178						-3					0	a		
RCV1-1	576,619	576,617	576,619	576,62	576,619	576,617		-2	0	1	2	3	1	0		
RCV5-1	583,036	583,039	583,039	583,039				3	3	3	0	0	0			
RCV8-1	581,728	581,734	581,735	581,734	581,723	581,722		6	7	6	1	0	-1	-5	-6	
RCV9-1	582,168	582,168	582,162	582,16				0	-6	-8	-6	-8	-2			
RCV10-1	582,421	582,425	582,426	582,424				4	5	3	1	-1	-2			
RCV11-1	581,718	581,726						8					0			
RAMOS	582,893	582,903						10					0			
MOLINA	583,611	583,615	583,604	583,61				4	-7	-1	-11	-5	6			
RCV8-5	581,099	581,106	581,099	581,104	581,093	581,087	581,089	7	0	5	-7	-2	5	-6	-12	-10
BN-S2	581,34	581,346						6					0			
RCV1-2	565,038	565,042	565,046	565,047	565,0271	565,019	565,021	4	8	9	4	5	1	-10,9	-19	-17
RCV3-2	565,306	565,308	565,312	565,312	565,291	565,289	565,291	2	6	6	4	4	0	-15	-17	-15
RCV5-2	564,94	564,94	564,945	564,946	564,931	564,923	564,923	0	5	6	5	6	1	-9	-17	-17
RCV8-2	565,018	565,016	565,022	565,024	565,011	565,009	565,008	-2	4	6	6	8	2	-7	-9	-10
RCV3-5	556,134	556,14	556,144	556,145	556,114	556,113	556,114	6	10	11	4	5	1	-20	-21	-20
RCV5-5	553,947	553,956	553,958	553,959	553,933	553,929	553,93	9	11	12	2	3	1	-14	-18	-17
RCV3-1	582,111	582,111	582,111	582,11	582,107			0	0	-1	0	-1	-1			
BN-S1	582,534	582,536						2					0			
BN-PA	551,245	551,25						5					0			
BN-S3	581,807	581,805						-2					0			
PIN# 2			550,49	550,491				0					1			
SANCHO			583,444	583,444	583,407	583,406		0					0			

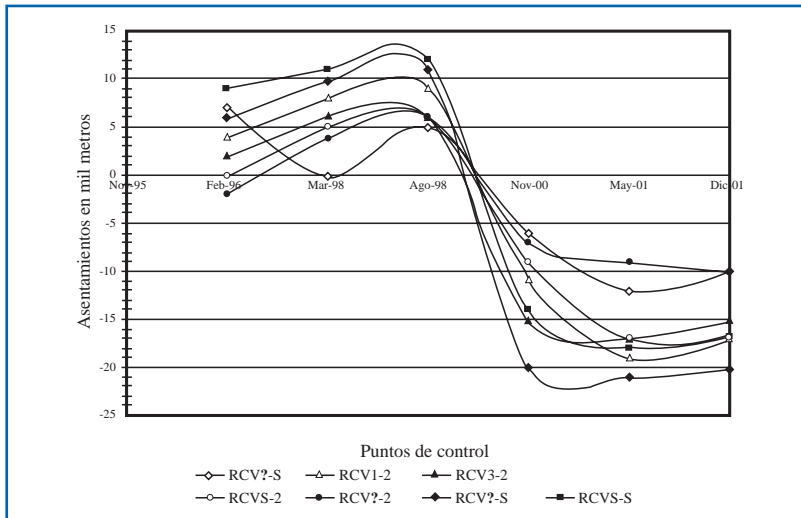


Figura 4
Asentamiento en el área del cuenco vertedor.

magnitudes de hasta 18 milímetros, se enmascara en el proceso de expansión que sufre el área producto de las excavaciones.

No es sino hasta mediados de 1999, posterior a que el área alcanza la cota de elevación que tenía en 1995, que las nivelaciones indican un proceso de subsidencia, con magnitudes de hasta 21 milímetros. Las magnitudes de los hundimientos registrados por las nivelaciones son similares a los obtenidos cuando se calcula en forma teórica la subsidencia máxima que se puede dar en el área. Los controles topográficos registrados en años posteriores, 2000 y 2001, indican que la zona que aloja el vertedor permanece estable.

Control planimétrico del área del vertedor

Con la finalidad primordial de monitorear la estabilidad de los taludes de la excavación, se implementó en conjunto con el control altimétrico, un control de desplazamientos en el plano horizontal (coordenadas Lambert Norte y Oeste) de los monumentos, también utilizados en el control altimétrico. Las fechas de los controles coinciden con

los del control vertical. Las precisiones alcanzadas en estos controles permiten asegurar los desplazamientos en el orden del milímetro.

El cuadro 2 muestra la comparación de coordenadas en la red planimétrica y las diferencias entre las distintas épocas en que se realizaron las lecturas. Estos controles, al igual que los de monitoreo vertical, se suspendieron en 1998 cuando la construcción de las paredes del vertedor limitó las visuales entre los puntos de control, perdiéndose la estabilidad y rigidez de las poligonales.

El análisis comparativo entre los controles realizados en 1995 y 1998 muestra que las márgenes de la excavación principal tenían una tendencia de desplazamiento en dirección opuesta a la excavación, con magnitudes del orden de los 9,8 milímetros. La figura 3 muestra el vector de desplazamiento resultante de las diferencias de la base medida en 1995, contra la última medición realizada en 1998. En ella se puede apreciar como los monumentos ubicados en la margen izquierda de la excavación presentaron un vector de desplazamiento con dirección noroeste y sureste. Por su parte, los monumentos de control ubicados en la margen derecha presentaron un desplazamiento con dirección noreste en su mayoría. Esta tendencia es coincidente con el proceso de levantamiento que se registró hasta mediados de 1998. De lo que se concluye que la zona se levantó en el orden de los 8 milímetros en promedio y que los taludes de las excavaciones se trasladaron en dirección opuesta a estas, en el orden de los 7 milímetros en promedio hasta 1998.

Las elipses en cada uno de los monumentos de control se denominan elipses de confianza y se obtienen utilizando métodos de ajuste de avanzados (Fig. 3). Estas elipses indicarán la validez o no de la magnitud del vector resultante; es decir, que aquel

Cuadro 2

Punto	4 medición				Diferencia entre épocas de medición en milímetros				Vector	
	1 medición Nov-95	2 medición Feb-96	3 medición May-98	4 medición Ago-98	1/2	1/3	1/4	Azimut	Distancia (mm)	
Sancho			575894,653	575894,658						
		206074,688	206074,687							
Molina	575680,413	575680,413	575680,411	575680,405	0	-2	-8	195°19'17"	7,569	
	206076,287	206076,287	206076,288	206076,292	0	1	5			
RCV8-5	575725,302	575725,309	575725,305	575725,298	7	3	-4	248°11'55"	4,308	
	206134,698	206134,699	206134,698	206134,696	1	0	-2			
RCV3-1	575929,686	575929,698	575929,689	575929,693	12	3	7	66°06'49"	7,656	
	206123,973	206123,974	206123,975	206123,976	1	2	3			
RCV9-1	575857,338	575857,353	575857,335	575857,338	15	-3	0	348°11'24"	1,53	
	206003,100	206003,095	206003,107	206003,101	-5	7	1			
RCV10-1	575839,790	575839,805	575839,794	575839,792	15	4	2	31°42'05"	3,995	
	205980,199	205980,191	205980,209	205980,202	-8	10	3			
RCV8-1	575854,592	575854,606	575854,591	575854,591	14	-1	-1	188°44'46"	9,207	
	206033,728	206033,708	206033,723	206033,719	-20	-5	-9			
RCV5-5	575774,422	575774,427	575774,421	575774,416	5	-1	-6	248°50'19"	6,648	
	206184,971	206184,966	206184,965	206184,968	-5	-6	-3			
RCV5-1	575901,742	575901,763	575901,744	575901,746	21	2	4	80°04'26"	4,061	
	206085,509	206085,507	206085,511	206085,509	-2	2	0			
RCV1-1	575946,141	575946,169	575946,141	575946,150	28	0	9	84°55'13"	9,035	
	206156,899	206156,890	206156,898	206156,900	-9	-1	1			
RCV5-2	575876,525	575876,535	575876,525	575876,524	10	0	-1	324°27'44"	1,72	
	206105,293	206105,284	206105,295	206105,295	-9	2	2			
RCV8-2	575828,016	575828,021	575828,017	575828,014	5	1	-2	205°20'46"	4,205	
	206054,454	206054,444	206054,451	206054,450	-10	-3	-4			
RCV3-2	575905,920	575905,935	575905,923	575905,924	15	3	4	61°51'30"	4,876	
	206142,488	206142,480	206142,487	206142,491	-8	-1	3			
RCV1-2	575927,790	575927,805	575927,793	575927,797	15	3	7	69°26'38"	7,69	
	206171,378	206171,372	206171,376	206171,381	-6	-2	3			
RCV3-5	575801,059	575801,062	575801,056	575801,051	3	-3	-8	288°02'03"	9,044	
	206224,367	206224,366	206224,365	206224,370	-1	-2	3			

vector que quede dentro del ámbito de la elipse tendría que ser descartado como dato no válido. Por el contrario, todo vector que sobrepase los límites de la elipse, es una magnitud por considerar como válida.

Control de bancos de nivel profundo

Un tercer mecanismo utilizado para verificar la ocurrencia de asentamientos en el área del vertedor fue la utilización de bancos de nivel profundo.

Inicialmente, se construyeron 6 instrumentos de este tipo en los alrededores del área del vertedor y de la presa. En la actualidad se controlan únicamente 4, dado que dos salieron de operación durante el proceso constructivo. Los bancos de nivel profundo consisten en un instrumento que permite medir la magnitud de la compactación o expansión de suelos ocurrida entre la superficie del terreno y una profundidad específica.

El sistema consiste en un anclaje o peso que se coloca en el fondo de una

perforación o pozo, construido específicamente con esa finalidad. El anclaje está sujeto a un cable, el cual no debe tener contacto con la pared de la perforación. En el extremo opuesto del cable, en la superficie del terreno, se coloca un contrapeso que mantiene el cable bajo tensión. Al cable o al contrapeso se le coloca un sistema de control, que permite medir los estiramientos o acortamientos que presente este con respecto a una lectura inicial. Estas diferencias en la longitud medida representarían las magnitudes de asentamientos o expansiones que se dan entre el fondo de la perforación y la superficie del terreno. Los controles de bancos de nivel profundo se utilizan en el proyecto desde el mes de octubre de 1996. En la actualidad, se cuenta con cinco años de registros continuos de estos aparatos.

La figura 5 muestra el gráfico con la tendencia de las lecturas efectuadas en 4 de los seis instrumentos colocados inicialmente. En el gráfico, un valor con signo positivo indicaría un acortamiento del cable, lo que se traduciría en un proceso de consolidación o acortamiento de las capas ubicadas entre la superficie y la profundidad del anclaje. Por el contrario, un valor con signo negativo indica un alargamiento del cable, lo cual se traduciría en una separación o expansión de las capas entre la superficie y el anclaje.

De la información de los datos representados se interpreta que desde el primer trimestre de 1997 y hasta febrero de 1998, los instrumentos registraron una tendencia de expansión, de los estratos monitoreados del orden de los 9,5 milímetros. Este período coincide con la finalización de las excavaciones e inicio del proceso de construcción del vertedor.

A partir de los primeros meses de 2000 los datos indican que se inicia una

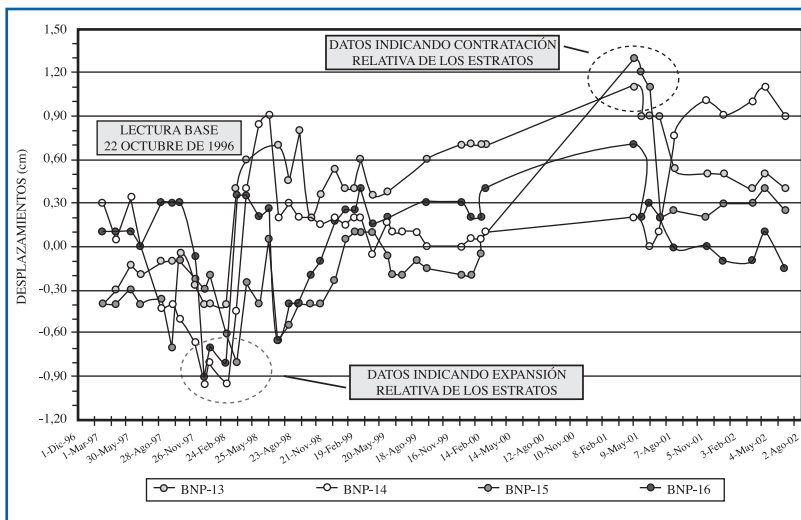


Figura 5

Lecturas en los bancos de nivel en el área del cuenco.

tendencia de contracción de las capas monitoreadas; lamentablemente, los instrumentos no se midieron desde febrero de 2000 hasta marzo de 2001, período en el que se da el llenado del embalse, del túnel y la entrada en operación de proyecto. Las lecturas efectuadas en los meses siguientes (abril 2001) sugieren una tendencia de contracción de los estratos en su etapa final. Estos comportamientos son coincidentes con fenómenos de levantamiento y asentamiento registrados por los monitoreos topográficos.

Lamentablemente, no fue posible encontrar el diseño de armado de los bancos de nivel profundo; por lo tanto, la referencia de profundidad de ubicación de los anclajes no se conoce. Tampoco se establecieron controles topográficos a nivel de superficie del banco de nivel profundo. Por lo anterior, los datos obtenidos con estos instrumentos son únicamente relativos y no se pudo establecer cuáles capas están directamente involucradas en los procesos registrados.

Conclusiones

Al igual que los procesos de sobreexplotación de acuíferos, los abatimientos intencionales de los acuíferos pueden modificar sustancialmente los sistemas hidrogeológicos y dar pie a la aparición de fenómenos colaterales como la subsidencia de suelos, poniendo en riesgo estructuras y edificaciones circundantes.

El área de estudio cuenta con un sistema de acuíferos múltiples, integrado por cuatro unidades. El de mayor extensión y espesor, denominado acuífero inferior, se ubica en el sector del embalse y cubre un área de 8,5 km² y tiene como límite norte el río Tuis.

El abatimiento intencional de los niveles piezométricos, por medio de pozos redujo las cargas en más de 19 m.c.a para el acuífero inferior y produjo

caudales de aporte de los pozos construidos del orden de los 190 y 200 L/s.

De acuerdo con el análisis teórico, la posible subsidencia que ocurriría en el área del cuenco vertedor por descompresión de la capa acuífera se estimó en 10,1 milímetros. La subsidencia por aporte o descompresión de los acuitardos se estima en 8,5 milímetros; dando como resultado una subsidencia total del orden de los 18,6 milímetros en el área de mayor descompresión y crítica del proyecto.

Los controles de nivelación topográfica de la superficie del terreno indicaron que el área del vertedor sufrió un proceso de levantamiento, cuyas mayores magnitudes fueron del orden de los 12 milímetros; este proceso se dio desde 1995 hasta 1998, fecha en que se realizaron las excavaciones que alojarían las estructuras principales. A partir de 1998, la zona presentó una tendencia de asentamiento.

Los controles realizados a partir de los bancos de nivel profundo indican que para finales de 1998 los estratos monitoreados, registraron una expansión relativa de 9,9 milímetros y una contracción del orden de los 12 milímetros en los primeros meses de año 2001. Estas fechas coinciden con las tendencias, de levantamiento y asentamiento, registradas por los controles planimétricos y de nivelación, del área.

Dado que el inicio del abatimiento de los acuíferos se dio en los primeros meses de 1995 y que este proceso se da en conjunto con el comienzo de las excavaciones, la subsidencia que debió de manifestarse en esa oportunidad, con magnitudes de 18,6 milímetros según los cálculos teóricos, se enmascara en la expansión que sufre el área producto del retiro de grandes cantidades de material como resultado de las excavaciones.

La tendencia de expansión que registró el área con magnitudes de hasta 12 milímetros se detiene en 1998, como lo evidencian los controles de nivelación, cuando se finaliza la construcción del vertedor y este entra en operación. El peso de la estructura del vertedor, sumado al peso del agua que este pueda contener, al iniciar su funcionamiento, sustituyen el material retirado, dando origen a un proceso de consolidación que llevan el área a su posición original. A partir de este momento, en el año de 1999, la estructura inicia un proceso de subsidencia, con magnitudes de hasta 21 milímetros, que finaliza en los últimos meses del año 2000, período a partir del cual el área se mantiene estable.

Las magnitudes de la subsidencia calculada por métodos teóricos de 18 milímetros y la registrada en el sitio a partir de los controles altimétricos con magnitudes de 21 milímetros, son muy similares y no representan un factor de riesgo para la estructura del vertedor principal.

Referencias bibliográficas

- Alvarado, G. y Leandro, C., 1997. Actualización Geología-Geofísica de los sitios en donde se construirán las grandes obras del P.H. Angostura. Un enfoque hacia problemas ingenieriles conexos. ICE. Departamento de Ingeniería Geológica (Informe Interno). 88 pp.
- Avilés, E. y Kauffman R. 1995. Determinación de la resistencia al corte del material que servirá de fundación el proyecto Angostura. ICE, Departamento de Ingeniería Geotécnica. (Informe Interno). 50 pp.
- Bergoeing, J. 1998. Geomorfología de Costa Rica. Instituto Geográfico Nacional. San José. pp. 409.
- Custodio, E. y Llamas, M. 1983. Hidrología subterránea. Editorial Omega, 2 vol. Barcelona, España. 2.350 pp.
- Domenico, P. and Schwartz, F. 1997. Physical and Chemical Hidrogeology [2ª ed.]. John Wiley & Sons, Inc. Phoenix, USA. 506 pp.
- Dumne, L. and Leopold, L. 1978. Water in Environmental Planing. W.H. Freeman and Company. New York.
- Freeze, and Cherry, J. 1988. Groundwater. Prentice Hall.
- ICE, 1997. Aspectos de diseño del P.H. Angostura. XVI Panel de Consultores. ICE, UEN PySA, Centro de Servicio de Diseño. ICE, proyecto hidroeléctrico Angostura, Turrialba. (Informe Interno). 133 pp.
- ICE, 1997. Estado de avance del proyecto para el IX panel de consultores; DIC, ICE, proyecto hidroeléctrico Angostura, Turrialba (Informe Interno). 133 pp.
- Laporte, M. 1990. Análisis de esfuerzos de la fundación del vertedor del P.H. Angostura. ICE, Dirección de Ingeniería Civil, Depto. Ingeniería Geotécnica (Informe Interno).
- _____, 1994. Análisis de esfuerzos de la fundación del vertedor del P.H. Angostura. ICE, Dirección de Ingeniería Civil, Depto. Ingeniería Geotécnica (Informe Interno).
- _____, 1997. Análisis de elementos finitos para la fundación del vertedor del P.H. Angostura. ICE, Dirección de Ingeniería Civil, Depto. Ingeniería Geotécnica (Informe Interno).
- Lohman S. W. 1972. Ground Water Hydraulics, Geological Survey Professional Paper 708, U.S. Government Printing Office, Washington. 70 pp.
- Losilla, M. 1995. Descompresión del acuífero en el cuenco de excedencias. Proyecto Hidroeléctrico Angostura. ICE, Departamento de Ingeniería Geológica, San José, Costa Rica. (Informe Interno). 26 pp.
- Vargas, A. y Cervantes F. 2000. Caracterización de acuíferos en el área de la presa del proyecto hidroeléctrico Angostura, Turrialba Costa Rica. Rev. Geol. de América Central, 23: pp 65-75. Universidad de Costa Rica.