# SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA XVII CONGRESO CHILENO DE HIDRAULICA

#### VALORANDO EL AGUA DE CAMPOS DE HIELO SUR

LUCIO CAÑETE A.<sup>1</sup> FRANCISCO CASTRO F.<sup>2</sup> ENRIQUE SAN JUAN U.<sup>3</sup> FELISA CORDOVA G.<sup>4</sup>

### **RESUMEN**

El recurso hídrico de Campos de Hielo de Sur, el cual tal como su nombre lo indica se presenta mayoritariamente en estado sólido, no ha sido valorado económicamente por la sociedad chilena en unidades monetarias. Esta ausencia de información ha provocado entre otras consecuencias, una incertidumbre respecto a las inversiones que en él se hubieren realizado. En efecto, se tienen antecedentes cuantitativos respecto al volumen de agua congelada, pero no respecto al valor que reporta toda esa cantidad. En tal sentido el presente trabajo propone una guía para valorar en unidades monetarias el agua sólida contenida en Campos de Hielo Sur, considerando la participación actual y potencial de dicho recurso en diversas actividades económicas de la nación entera. Debido a la complejidad de dicha participación, el presente artículo tan sólo expone la valoración de acuerdo a un rol preferentemente geopolítico, el cual según lo observado, es el aspecto más débil tanto para los intereses públicos como privados de Chile como nación. Por lo tanto, los resultados obtenidos a través de una modelación del efecto Barrera Vecinal deben considerarse como una cota inferior para el valor del agua de la unidad territorial en cuestión.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Científico de Proyectos, Zañartu Ingenieros Consultores S.A., E-mail: lcanete@zanartu.cl

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Gerente de Desarrollo, Zañartu Ingenieros Consultores S.A., E-mail: fcastro@zanartu.cl

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Académico del Departamento de Tecnologías Industriales de la USACH, E-mail: esanjuan@usach.cl

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Académica del Departamento de Ingeniería Industrial de la USACH, E-mail: fcordova@usach.cl

#### 1. CAMPOS DE HIELO SUR COMO UNA ZONA EXTREMA CHILENA

El conocimiento y posterior dominio del territorio por parte del Hombre, se ha visto desde tiempos inmemoriales acotado por las restricciones que determinados espacios de dicho territorio imponen a las capacidades físicas humanas.

Geográficamente, dichos espacios de condiciones hostiles son conocidos bajo la denominación de Zonas Extremas; y tal como su nombre lo indica, en ellos ciertas variables naturales registran comportamientos extremos que entorpecen los procesos fisiológicos de los seres humanos. La concentración de oxígeno disponible sobre los 4 mil metros de altitud, las variaciones térmicas día-noche mayores a los 30 °C, las pendientes de 50° en suelos de cohesión 0,4 kg/cm², los vientos sobre los 100 Km/hora, la radiación solar superior a los 250° Kcal/cm² y una humedad relativa inferior al 35%; son valores de algunas variables naturales que generan escenarios adversos a las actividades humanas.

A una escala cósmica, las Zonas Extremas típicas son los cuerpos celestes donde el Hombre manifiesta algún interés, destacándose a Marte como planeta y a la Luna como satélite natural. A escala planetaria terrestre se identifican los desiertos, los casquetes polares y los fondos abisales marinos. A nivel nacional y desde un punto de vista económico, político y científico; son importantes el fondo del océano Pacífico, la Antártica, las altas cumbres de la cordillera de Los Andes el desierto de Atacama y los Campos de Hielo Norte y Sur entre otras zonas.

Esta última Zona Extrema es una de las más extensas de nuestro país alcanzando casi 13000 Km², con más de 360 Km de longitud y una profundidad que en ciertos sectores llega a los mil metros. Campos de Hielo Sur se caracteriza por los fuertes vientos y evidentemente por sus bajas temperaturas, que unido a una geomorfología glaciar activa dificultan los asentamientos humanos permanentes y cualquier otra actividad de exploración de terreno.

Pese a ser la segunda reserva mundial de agua dulce del planeta, la sociedad chilena no tiene al menos formalmente una estimación cuantitativa del valor de toda el agua sólida contenida en Campos de Hielo Sur. En efecto, su natural condición hostil ha sido la principal causa de que la generación de información desde esta Zona Extrema haya sido deficiente respecto de otras porciones del territorio nacional. Así paradójicamente, pese a tener una estimación volumétrica del agua sólida contenida en Campos de Hielo Sur, los chilenos desconocen cuánto para ellos vale toda esa agua.

#### 2. LA INCERTIDUMBRE SOBRE EL VALOR DEL AGUA SOLIDA

¿ Por qué debemos valorar el agua de Campos de Hielo Sur ? Simplemente para tomar decisiones. Ciertamente el agua sólida que alcanzaría los 7500 Km³ participa directa o indirectamente en varias actividades económicas de cierto interés para la sociedad chilena. Si se desconoce el rol que toda esa agua tiene y de cómo contribuye al bienestar nacional, tanto actual como potencial; no se pueden tomar decisiones certeras sobre la gestión de dicho recurso hídrico

Puesto que las decisiones se concretan ya sea a nivel estatal o privado en destinaciones de otros recursos cuya contabilidad se expresa en unidades monetarias, resulta imprescindible obtener un valor auque sea aproximado del agua sólida expresada en las mismas unidades monetarias.

Una vez conocido dicho valor se podrán acotar inferior y/o superiormente las inversiones en exploración, explotación, defensa o cualquier otra actividad productiva sobre el agua de Campos de Hielo Sur.

# 3. LOS ACTUALES METODOS DE VALORACIÓN

Una vez comprendida la utilidad de valorar económicamente el agua de Campos de Hielo Sur, emerge la pregunta del cómo hacerlo. Afortunadamente el avance de las ciencias económicas y ambientales ha respondido en forma parcial a esta pregunta. La respuesta es parcial debido a que los métodos vigentes entregan resultados aproximados, la mayoría de ellos soportados sobre variables *proxis*, cuya precisión y exactitud depende de cómo se modelen tales variables. En general, todos los métodos buscan una equivalencia entre lo que se está dispuesto a sacrificar por preservar un elemento ambiental cuando éste cumple un rol beneficioso o entre lo que se está dispuesto a recibir como compensación al soportar un elemento que cumple un rol perjudicial (Faucheux, Noel, 1995)

Los métodos en cuestión han sido aplicados con satisfactorio éxito en Chile en diversos proyectos, cuyos resultados más provechosos se han observado en proyectos viales. Así se ha logrado expresar un unidades monetarias bienes que carecen de mercados explícitos o que simplemente no lo tienen. Tal es el caso por ejemplo de un cementerio indígena, de un esqueleto de mastodonte, de un paisaje o de una cría de huemul.

La valoración de esos bienes en unidades económicas como se explicó anteriormente, ha permitido tomar importantes decisiones en el proyecto vial que los compromete. Retomando el ejemplo, si el costo de rodear un sitio de nidificación de aves para evitar su destrucción aumentando la longitud total de un camino es superior al valor que tienen las aves comprometidas; tal rodeo no deberá realizarse.

#### 4. UN PROCEDIMIENTO PARA VALORAR EL AGUA CONGELADA

Tal como se deduce de párrafos anteriores, las características de Campos de Hielo Sur como parte del territorio nacional la hacen suponer con una alta valoración, la cual aún no ha sido cuantificada. En efecto, actualmente ni el Estado de Chile ni particulares chilenos manejan la contabilidad expresada en unidades monetarias de los acervos minerales, faunísticos, vegetacionales, turísticos ni hidrológicos entre otros, que para la nación entera posee la mencionada Zona Extrema.

Ciertamente tal ausencia de información de los activos se debe a que no se cuenta con un catastro físico del contenido de los elementos territoriales de Campos de Hielo Sur. Sin embargo, ya existe una mensura aproximada de diversos elementos tales como la radiación solar, la velocidad del viento y otros que pueden ser valorados monetariamente de acuerdo a métodos derivados desde las ciencias económicas y ambientales. De acuerdo a estas hipótesis, es posible configurar el siguiente procedimiento de cuatro pasos para estimar el valor del agua sólida de Campos de Hielo Sur.

- Primer paso: catastrar espacial y temporalmente el contenido de agua sólida en Campos de Hielo Sur.
- Segundo paso: identificar las funciones que dicha agua tiene en la sociedad chilena.
- Tercer paso: aplicar métodos clásicos de valoración ambiental o combinaciones de ellos para cuantificar el valor económico de las funciones.
- Cuarto paso: generar una cartografía dinámica de áreas isovaloras.

A continuación se revisan las implicancias de los dos primeros pasos, en donde la ingeniería hidráulica chilena presenta los mayores desafíos.

# - Catastro espacio-temporal del agua sólida

Por extraño que parezca, entre los organismos chilenos dedicados al estudio de las Zonas Extremas y en particular de la criósfera (conjunto de todos los espacios congelados del planeta Tierra), no existe consenso respecto al volumen actual de agua congelada que contiene Campos de Hielo Sur. Ciertamente para calcular un cantidad, se debe disponer de argumentos métricos fuertes que no han sido expuestos, debido principalmente al carácter hostil para realizar mensuras directas.

En efecto, la percepción remota puede entregar con aceptable precisión la extensión planimétrica de los hielos, pero no puede aportar datos fidedignos de altimetría. Es decir, la profundidad o espesor del cuerpo de agua congelada es la principal incógnita.

Esta incógnita puede anularse a través de técnicas geofísicas, particularmente de gravimetría y sismografía (US Army, 1995). Sin embargo, la aplicación de dichas técnicas requieren la disposición de instrumental sobre el mismo cuerpo de agua congelada, actividad en extremo costosa para seres humanos.

Debido a las condiciones meteorológicas y geomorfológicas de Campos de Hielo Sur, se plantea como alternativa a la mensura por parte de seres humanos, a autómatas acoplables estructural y funcionalmente al citado escenario adverso. Así se hace imprescindible disponer de robots terrenos u otros artefactos que con cierta autonomía puedan interactuar directamente con su entorno gélido. Esta interacción directa debe ser tanto a través de un contacto mecánico con los objetos en estudio para aumentar la precisión y exactitud del levantamiento, como a través de una presencia directa para evidenciar actos soberanos.

Afortunadamente, varias organizaciones chilenas están avanzando en la mencionada tecnología de exploración y se espera que dentro de un par de años existan autómatas *made in Chile* operando sobre la superficie de Campos de Hielo.

Por otra parte, un asunto es obtener ahora la profundidad y con ello el volumen total del cuerpo del hielo y otro distinto pero igual de necesario es pronosticar su futura variación temporal. Al respecto mucho se ha escrito sobre el Calentamiento Global y su incidencia sobre las grandes masas de hielo, las cuales están expuestas a variaciones geométricas y por ende a variaciones en cuanto a su valor monetario. Indiscutiblemente, cualquier decisión que se tome en el presente es respecto al comportamiento futuro de ciertas variables de interés y según lo examinado, no existen proyecciones con su respectiva probabilidad de ocurrencia de la variación del volumen de agua de Campo de Hielo Sur para las próximas décadas ni para los próximos siglos.

Para realizar tal pronóstico, existe capital humano satisfactoriamente preparado desde las universidades chilenas, el cual con un mediano apoyo computacional, puede realizar las simulaciones pertinentes y así establecer con aceptable aproximación, series de tiempo para diversas variables físicas y geométricas de Campo de Hielo Sur.

# - Las función del agua como nutriente

La primera función del agua, quizás aquella de mención más espontánea se relaciona con el rol de nutriente, siendo parte integrante y activa de todos los seres vivos. La participación del agua como componente para la vida es tan importante, que todos los animales incluido el Hombre, están formados mayoritariamente por este elemento. Más aun, la materia gris del cerebro está formada en un 80% por agua pura (Giordan, 1999).

Para esta función, el agua de Campos de Hielo Sur presenta dos desventajas, una respecto a su fase y otra respecto a su localización.

Primeramente, el agua está congelada y su uso para bebida y/o riego demanda energía para derretirla. A través de la propia definición de caloría se puede deducir la cantidad de calor que debería por medios artificiales aplicarse a un metro cúbico de hielo que se encuentra a -1 °C para convertirlo en líquido.

Lo segundo es que Campos de Hielo Sur se emplaza en regiones donde el agua líquida y limpia es muy abundante. Allí existe un superávit hídrico con un aporte de precipitación de 7000 mm/año frente a una evapotranspiración real de menos de 400 mm/año (DGA,1987).

La demanda sensible de agua se localiza miles de kilómetros al norte, desde la Zona Central hasta el Norte Grande y aun si el agua estuviera derretida en Campos de Hielo Sur, el costo de transporte de ella rumbo septentrional sería muy costoso. Resultaría más rentable desalinizar el agua de mar en las costas de las regiones donde existe demanda y bombearla hacia el interior de la estrechez de Chile Continental.

Por lo tanto, la desventaja de fase y de localización, cada una por separado o ambas en conjunto; no hacen atractivo el uso del agua de Campo de Hielo Sur como nutriente, al menos con la tecnología energética actual.

# - La función del agua como configuradora espacial

La radiación solar se comporta diferente al incidir sobre un hielo que sobre una superficie de tierra desnuda o con cobertura vegetal. El viento y evidentemente la humedad entre otras tantas variables ambientales, también se comportan diferente.

Incluso los millones de toneladas de peso de Campos de Hielo Sur deberían tener una incidencia isostática sobre la corteza terrestre.

Ciertamente, el hielo genera múltiples efectos en otros componentes del espacio geográfico, el cual en su acepción más amplia de paisaje, provocan una singularidad climática, geomorfológica y biótica del territorio.

Respecto a esta función en particular, aquí el agua congelada es mayoritariamente percibida no como un bien. En efecto, al limitar ambientalmente la vida metazooaria y al presentarse los hielos como una carpeta que debe ser penetrada para acceder a algún recurso mineral de la roca y suelo, ésta participa deteriorando el bienestar. Esta es entonces la esencia de Zona Extrema, una parte del territorio que no ha sido apropiado. Es decir, que debido a sus severas condiciones naturales, le es a la sociedad chilena de difícil apropiación.

Económicamente aquí existen recursos minerales y biológicos entre otros, que si no existiera el agua de Campos De Hielo, podrían explotarse. Puesto que no se sabe cuales son esos recursos, no se puede calcular en unidades monetarias las oportunidades perdidas (Walliser, Prou, 1988).

A través de esta última observación se retoma la importancia de campañas de exploración sobre la Zona Extrema en cuestión. Mientras no exista ese catastro de recursos cuya existencia del hielo impide explotar, la ingeniería hidráulica chilena no podrá aportar a la toma de decisiones.

# - La función del agua como Barrera Vecinal

Campos de Hielo Sur no sólo es una Zona Extrema para la sociedad chilena, sino debido a la severidad de su comportamiento natural, lo es para cualquier otra sociedad humana. Si las temperaturas, vientos y geomorfologías dificultan las actividades productivas para las organizaciones chilenas, también lo hacen para organizaciones de otras nacionalidades.

Según esto, el agua congelada de Campos de Hielo Sur tiene un importante rol de barrera al dificultar las acciones motivadas por el deseo de acceder hacia el océano Pacífico, justamente en sectores donde el borde costero está a menos de una decena de kilómetros de la frontera

En este contexto, al revisar las teorías geopolíticas tanto tradicionales como actuales, se observa que la pérdida efectiva de una parte del territorio se registra cuando se materializa un asentamiento humano por el Estado invasor (Ratzel, 1987). En este caso, el escenario que crea el agua congelada no tan sólo dificulta la materialización de un asentamiento humano; sino además el transporte por vía terrestre.

Resumiendo, pese a que las funciones del agua de Campos de Hielo Sur son muchas y que en el presente artículo sólo se presentan tres, en lo que resta de éste tan sólo se cuantificará el rol de Barrera Vecinal.

Se ha seleccionado esta única función por una parte debido a que para cuantificarla monetariamente no se necesita mucha precisión de la geometría y densidad de los hielos, bastando con las mensuras actuales. Por otra parte ha influido en esta selección la novedad de cuantificar el rol geopolítico del agua como recurso.

# 5. LA BARRERA VECINAL: ¿ CUÁNTO A LO MÁS VALE?

En principio, el método para cuantificar la función de una Barrera Vecinal en un contexto geopolítico, es el mismo que se aplica para cuantificar cualquier otra barrera considerada como un bien. Así por ejemplo, la cerca del predio de un agricultor impide que el ganado se escape o la reja de una casa impide que los ladrones ingresen al hogar. En términos simples, una barrera actuando como un bien dificulta el flujo de agentes, separando el espacio en dos y manteniendo ciertos agentes en uno de dichos subespacios. Retomando el ejemplo: el ganado no sale del predio ni los ladrones entran a la casa.

En el ejemplo, tanto la cerca como la reja son creaciones antrópicas y su valor es nítido al medir el bienestar que se le reporta al agricultor y a los miembros del hogar. En efecto si un agricultor decide disponer una cerca durante una temporada que impide la fuga de ganado que él valora en \$ M, el valor de dicha cerca para el sujeto tendrá un máximo que no superará a \$ M.

Supóngase ahora que se trata de una barrera natural. Por ejemplo un río que impide que cierta plaga de roedores terrestres lleguen a una zona de hortalizas. En este caso, el río fluye

naturalmente confinando "afuera" a los roedores y la existencia de este curso de agua no reviste ningún costo para el agricultor. Supóngase ahora que el hidrólogo asesor del agricultor informa que el debido a la sequía que se acerca el río disminuirá su caudal, mientras el veterinario le comenta que con ese nivel inferior de agua los roedores alcanzarán sin problema las hortalizas. ¿ Cuánto vale el río para el agricultor ? Vale a lo más lo que perdería si el río no cumpliera su función de barrera. Es decir, en valor absoluto a lo más sería lo que él perdería por la acción de los roedores.

Con este razonamiento se está en condiciones de abordar el asunto de la Barrera Vecinal que tiene el agua de Campos de Hielo. Vale a lo más la suma de todas las pérdidas que se registraría si dicha agua no actuase como barrera.

¿ Cuándo se pierde dicho efecto barrera? Cuando las condiciones del entorno, en esta caso del hielo, crean un escenario propicio para el desplazamiento terrestre humano, particularmente para la infantería. En la actualidad, la temperatura, viento y geomorfología glaciar demandan un consumo de 30000 joules por cada metro avanzado en un tramo de una veintena de kilómetros durante una campaña de 18 horas como máximo. Si la rigurosidad disminuye a la mitad; es decir a 15 Kj/m para la misma duración de la campaña, que es el tiempo máximo estimado en que tardaría en percibirse la invasión, el efecto barrera en cuestión ya no existiría.

# 6. LA PROBABILIDAD DEL EVENTO NO DESEADO POR SU DAÑO

En el numeral precedente se evidenció que cuando la Barrera Vecinal no cumple su función se produce un daño por cuanto el invasor ya posiciona a los suyos en el territorio a ocupar. Sin embargo, la pérdida de la función no es una cuestión determinística, es un asunto de probabilidades.

Considerando entonces un horizonte de planeación de 100 años, el cual coincide con el Tricentenario de Chile; se simuló la reducción planimétrica de Campos de Hielo Sur y con ello el cambio ambiental necesario para demandar 15 Kj/m, estimándose que para dicho periodo el agua congelada perdería el efecto barrera frente al fiordo Asia a 50°20' de latitud sur y a 73°28' de longitud oeste con una probabilidad de 0,2.

¿ Cuál es el daño ? Una ocupación a través de asentamientos humanos implicaría la pérdida tácita del la parte del territorio ocupado. Esta parte del territorio tendría un escenario más benigno que el actual en términos naturales, presentando un paisaje similar al relicto en el valle del Balmaceda en la provincia de Última Esperanza, cuyos predios más parecidos a la nueva superficie que según la simulación será abandonada por los hielos, se transan en 50 millones de pesos por hectárea.

Puesto que la superficie expuesta es de por lo menos 62 500 há, el total a precios de mercado bajo esas simples consideraciones alcanza a 3,125 \* 10<sup>12</sup> pesos chilenos.

Asumiendo el Riesgo, es decir multiplicando dicho daño por la probabilidad de ocurrencia, se tiene un costo de  $0,625 * 10^{12}$  pesos chilenos.

Ciertamente este valor constituye una cota inferior por cuanto otros sumandos derivados de la pérdida del efecto barrera tales como la continuidad territorial, no han sido agregados.

#### 7. CONCLUSIONES GENERALES

El trabajo en sí integra aspectos económicos, ambientales y geopolíticos con el propósito de obtener al menos una cota inferior del recurso agua contenido en Campos de Hielo Sur.

El trabajo desarrollado cuyos resultados parciales se exponen en el presente artículo, constituye una primera aproximación para estimar el valor del agua realizando una función que la sociedad chilena a descuidado. En efecto, los modelos empleados presentan una carencia de precisión y exactitud debido a la imprecisión de los datos de entrada. Sin embargo, dichos resultados pueden mejorarse conforme se realicen más levantamientos de Campos de Hielo Sur. Estos levantamientos pueden aumentar en cantidad y calidad a través del interés que debiera despertar el alto valor de recurso primariamente valorado en unidades monetarias.

Se espera que el presente trabajo sea un estímulo para que diferentes sectores de la sociedad chilena asuman iniciativas respecto a este importante parte del territorio nacional.

### **REFERENCIAS**

Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas DGA. 1987. "Balance Hídrico de Chile". Santiago de Chile

Faucheux, S. y Noël, J-F. 1995. "Economie des ressources naturelles et de l'environnement". Armand Colin. Paris.

Giordan, A. 1999. "Mon corp, la premiere merveille du monde". Editions Jean-Claude Lattes, Paris.

Ratzel, F. 1987. "Politische oder Geographie die Staaten, des Verkeheres und des Krieges".

US Army Corps of Engineers. 1995. "Geophysical Explorations for Engineering and Environmental Investigations". Washington.

Walliser, W. y Prou C. 1988. "La science économique". Ëditions du Seuil. Paris.