

## **EVALUACION DEL POTENCIAL TECNICO DE LA IMPLEMENTACION DE ENERGÍA SOLAR TÉRMICA PARA EL CALENTAMIENTO DE AGUA DE USO SANITARIO EN LA PROVINCIA DE SALTA**

**I. Cruz<sup>12</sup>, S. Sauad<sup>1</sup> y M. Condori<sup>3</sup>**

Cátedra de Formulación y Evaluación de Proyectos Ambientales y de Recursos Naturales. Cátedra de Economía Ambiental y de los Recursos Naturales. Universidad Nacional de Salta.

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional (INENCO) C.P. 4400 – Salta

Tel. 0387-4258709 – Fax 0387-4255489

e-mail: [icruz.unsa@gmail.com](mailto:icruz.unsa@gmail.com)

*Recibido 26/07/17, aceptado 29/09/17*

**RESUMEN:** Se presenta un estudio del potencial de sustitución de fuentes convencionales por energía solar térmica, para el abastecimiento de la demanda energética de agua de consumo sanitario residencial. La sustitución se evalúa en base a un potencial técnico que aplica el método f-chart y a un indicador de carga térmica unitaria, desarrollados en un entorno de sistemas de información geográfica. Se obtuvieron mapas de carga térmica unitaria, demanda energética y potencial técnico de sustitución. Los resultados obtenidos constituyen un sistema de soporte a las decisiones que permitirá planificar la implementación sustentable de sistemas solares de calentamiento de agua.

**Palabras claves:** sistemas solares de calentamiento de agua, sustitución energética, potencial técnico de sustitución, agua de consumo sanitario, planificación energética, f-chart

### **INTRODUCCIÓN**

La demanda energética para calentamiento de Agua de Consumo Sanitario (ACS), a nivel mundial, representa una proporción importante del consumo residencial de gas y electricidad. Los Sistemas Solares para Calentamiento de Agua Sanitaria (SDHWS) tienen potencial para abastecer dicha demanda, pero su implementación a escala regional requiere de la formulación de políticas energéticas basadas en la estimación del potencial solar y la evaluación de la demanda energética por zona (Voivontas et al., 1998, Altobelli et al., 2014).

Los SDHWS aún realizan una contribución modesta a la matriz energética mundial. Entre las principales barreras que limitan su implementación, a gran escala, se encuentran: 1) la carencia de un marco legal institucional y organismos nacionales abocados a la promoción y regulación de la implementación de SDHWS, 2) costos de inversión superiores al de sistemas convencionales, 3) poco desarrollo del mercado de SDHWS, y 4) ausencia de incentivos económicos y financieros (Lannelli et al., 2016). La definición de un marco legal- institucional e instrumentos económicos y financieros para la promoción de la implementación de SDHWS, a escala regional, requieren de un proceso de planificación energética basado en el estudio del potencial técnico de la sustitución. El potencial técnico puede definirse como la capacidad del recurso solar para satisfacer la demanda energética de un uso final, con una tecnología específica. La cuantificación del recurso renovable integrada a la estimación de la demanda energética, permite evaluar ex ante los impactos económicos, ambientales y sociales de políticas energéticas, maximizando los beneficios de una asignación estatal de recursos. (Rachamandra, 2009).

La literatura evidencia que el potencial técnico de los SDHWS, a nivel micro, se encuentra ampliamente estudiado (desempeño, funcionamiento, rendimiento y eficiencia, para un punto geográfico) (Ibrahim y et al., 2017). Diversos estudios han evaluado la performance de los SDHWS,

---

<sup>1</sup>Cátedra de Formulación y Evaluación de Proyectos Ambientales y de Recursos Naturales. Facultad de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Salta.

<sup>2</sup>Becario INENCO- CONICET

<sup>3</sup>Investigador INENCO

mientras que otras investigaciones se han centrado en la construcción de modelos matemáticos para la simulación del funcionamiento de estos sistemas (Kalogirou, 2004).

La estimación del potencial técnico, a nivel regional (macro), plantea la complejidad de la integración de los parámetros técnicos de los SDHWS con la heterogeneidad de las condiciones climáticas y las variables demográficas del territorio. Pillai y et al. (2007) definieron una metodología para la estimación del potencial de implementación de SDHWS teniendo en cuenta los factores de adopción y los factores que afectan al mercado nivel macro. En este estudio, el potencial técnico de los SDHWS se estimó en cada punto de uso final por simulación utilizando TRNSYS, a posteriori se calcularon los ahorros derivados de la sustitución energética y los beneficios económicos respectivos. En Zimbabwe se construyeron escenarios prospectivos de 25 años para evaluar los beneficios económicos, sociales y medioambientales de tecnologías para el calentamiento de ACS. Para este caso, se determinó que mediante la implementación de SDHWS es posible reducir la demanda pico de electricidad en invierno en un 13% y la demanda de energía final en un 27%, suponiendo una tasa de penetración del 50% de los SDHWS. En consecuencia, la implementación de SDHWS trae aparejado un ahorro de \$ 250 millones de dólares y una reducción de las emisiones de CO<sub>2eq</sub> del 29 % (Batidzirai et al. 2009). Chandrasekar y Kandpal (2004) desarrollaron un nomograma para estimar el número de hogares que podían ser abastecidos con instalaciones domesticas de SDHWS en la India. Este modelo incluye entre sus variables la capacidad financiera de las familias para adquirir los SDHWS, además de los aspectos técnicos.

En la actualidad, la complejidad inherente a la evaluación del potencial técnico de los SDHWS a nivel territorial se aborda mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Voivontasy et al. (1998) propusieron un modelo para evaluar el potencial de los SDHWS para uso doméstico mediante GIS. Este modelo incluye en el análisis de variables geográficas que determinan el potencial del recurso solar, variables demográficas y eficiencia energética de la tecnología. El modelo desarrollado se utilizó para estimar el potencial de calentamiento solar de agua en Grecia, relacionando la demanda de energía de ACS con el recurso solar, a fin de estimar la proporción de la demanda energética de ACS que puede ser abastecida mediante energía solar térmica. En Estados Unidos el rendimiento técnico y económico del calentamiento de agua con SDHWS también fue estudiado mediante el uso de SIG. Para este estudio de caso se obtuvo que si un consumidor típico residencial, implementa SDHWS puede reducir la demanda de energía de calentamiento de agua en un rango del 50-85 % generando un ahorro de 1600-2600 kWh por año (Cassard, Denholm, and Ong 2011).

El presente trabajo tiene por objeto la estimación de la demanda de energía para calentamiento de ACS, la definición de un indicador de carga térmica unitaria para calentamiento de ACS que incluya el efecto de las condiciones fisiográficas y climáticas de la región, y la estimación del potencial técnico de la implementación de SDHWS en la Provincia de Salta. El estudio se propone definir las interrelaciones espaciales entre la disponibilidad de la radiación solar, clima, densidad poblacional y los ahorros de energía esperados obtenidos a partir de una implementación a gran escala de SDHWS, coadyuvando a la planificación energética de la región.

## **LA DEMANDA ENERGÉTICA PARA EL CALENTAMIENTO DE ACS**

Uno de los componentes esenciales para evaluar el potencial de los SDHWS para abastecer la demanda de ACS a nivel regional, es la demanda energética específica para calentamiento de ACS (J/persona\*día). Son reducidos los estudios que abordan esta temática, dada la complejidad inherente a su estimación. Entre los múltiples factores que interaccionan en la demanda energética específica para ACS, se encuentran: las pautas culturales de consumo y comportamiento, las condiciones climáticas del área (temperatura ambiente, amplitud térmica, altitud, temperatura del agua de red, etc.) y las características técnicas de la tecnología empleada para el calentamiento del ACS. En términos generales, aún suponiendo un consumo específico medio de ACS y una misma tecnología de calentamiento de agua, la demanda energética específica fluctúa en función de las condiciones climáticas y fisiográficas de una región.

En Argentina, la demanda energética específica para calentamiento de ACS ha sido estudiada solamente para el área urbana, en base al análisis del consumo específico de los usuarios conectados a la red de gas natural. En estos estudios la demanda energética específica de ACS se estima, sin considerar el efecto de las condiciones climáticas del lugar. No existen para Argentina, datos de

demanda energética de ACS de la población rural dispersa o sin conexión a la red de gas natural. La demanda energética total y específica para calentamiento de ACS, no ha sido aún estimada para la Provincia de Salta.

En Argentina, la demanda energética urbana para ACS se cubre principalmente con gas natural. El consumo de gas natural para el calentamiento de ACS y cocción de alimentos, es un componente del consumo de base que se encuentra en función de la temperatura ambiente (Figura 1). Para la región Noroeste de Argentina dicho consumo corresponde aproximadamente al 49 % del consumo específico residencial (Gil and Deferrari 2004). Lason et al., (2014) determinaron que la pendiente de la función del consumo de base de gas es negativa. A la vez que, si la temperatura ambiente desciende en 10 °C el consumo base de gas se incrementa en 0,50 m<sup>3</sup>/día, equivalentes a 4.650 kcal/día. En base a ello y suponiendo una masa de 20 l para cocción de alimentos, estimaron un consumo medio de ACS de 100 l/persona\*día. Si bien este consumo es nominal, se encuentra por encima de los estándares europeos que recomiendan un consumo de 40 l/persona\*día (Voivontas, Tsiligiridis, and Assimacopoulos 1998).

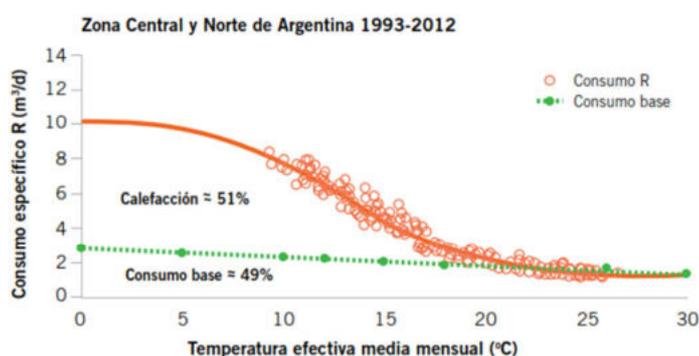


Figura 1. Variación de los consumos específicos R (residencial, círculos). Fuente: Lanson y otros (2014).

Bezzo et al, (n.d.) proponen una distribución del consumo base de gas, basada en un consumo promedio de 2 m<sup>3</sup>/persona\*día (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.). En dicho estudio, el consumo energético para calentamiento de ACS se estimó en 1 m<sup>3</sup>/persona\*día, equivalente a 9.375 Kcal/persona\*día. A nivel nacional, considerando los usuarios residenciales conectados a la red de gas natural (7.000.000 de usuarios-ENARGAS) y los usuarios de gas licuado (3.000.000 usuarios), el consumo energético asociado al calentamiento de ACS asciende a aproximadamente a 15.000.000 m<sup>3</sup>/día.

Tiempo estimado de uso	Actividad	Consumo estimado		
		kcal/h	kcal/día	m <sup>3</sup> /día
2,5 h/día	Cocción	1800	4500	0,5
45 min/día	Calentamiento agua	12.500	9375	1,0
24 h/día	Piloto	190	4650	0,5
	Consumo específico base		18.525	2,0

Tabla 1 Modelo de distribución del consumo base de gas natural por usuario. Fuente: Bezzo, 2011.

## METODOLOGÍA

El efecto de las condiciones climáticas sobre la demanda energética unitaria se evaluó a partir del indicador Carga Térmica Unitaria (Qload), conceptualizada como la energía necesaria (J) para elevar la temperatura de cañería de un litro de agua a la temperatura de referencia del ACS, para un mes del año. El potencial técnico de la implementación de SDHWS se evaluó para la Provincia de Salta, mediante la aplicación del método f-chart, para las cuatro estaciones del año. El método f-chart permite estimar la fracción de la demanda energética que puede ser cubierta por el recurso solar (f), en base a parámetros adimensionales

A fin de exponer el efecto conjunto de la heterogeneidad de las condiciones fisiográficas y climáticas, con las variables demográficas del territorio, se trabajó con un análisis territorial en SIG.

El cálculo del factor  $f$  se realizó en base a la aplicación de dos modelos: 1) Estimación de la radiación solar sobre la superficie inclinada del colector solar, y 2) Cuantificación de la demanda energética para ACS o carga térmica a abastecer.

### *Carga térmica unitaria Qload*

La carga térmica unitaria evidencia el efecto físico de las condiciones climáticas sobre los requerimientos energéticos para elevar la temperatura del agua de cañería a la temperatura de referencia para ACS. La expresión algebraica del indicador es la siguiente:

$$Qload = \rho C_p (T_{ref} - T_{af})$$

Donde:

$\rho$  = Densidad del agua ( $1 \text{ Kg/l}$ ).

$C_p$  = Calor específico del agua ( $4,186.00 \text{ J/KG } ^\circ\text{C}$ )

$T_{ref}$  = Temperatura de referencia ( $55^\circ\text{C}$  según Voivontas y et al., 1998)

$T_{af}$  = Temperatura del agua de cañería para el mes  $n$  ( $^\circ\text{C}$ ).

Las características climatológicas y fisiográficas de cada sitio geográfico de consumo, se incluyeron en el modelo a partir de la estimación de la variable Temperatura del agua fría o temperatura de cañería ( $T_{af}$ ). Para su cálculo se aplicó la metodología propuesta por el Canmet Energy (2001), generándose un perfil sinusoidal de  $T_{af}$  para cada estación del año, en base a las temperaturas media mínima mensual y media máxima mensual. Los valores de las variables de entrada para la estimación de  $T_{af}$  fueron obtenidos de la base de datos WorldClim (2016), se trabajó con imágenes satelitales con una definición de 30 segundos para la construcción del SIG.

### *Estimación de la demanda de energía para ACS*

La demanda de energía térmica del ACS es la cantidad de energía necesaria para incrementar la temperatura del agua de consumo sanitaria, desde la temperatura de entrada de cañería hasta la temperatura de referencia. Las propiedades del agua se encuentran en función de su densidad y calor específico a presión constante. La expresión algebraica que define la demanda energética para ACS, es la siguiente:

$$D_{ACS} = Q_{ACS(t_{ref})} \rho C_p (T_{ref} - T_{af}) N P$$

Donde:

$D_{ACS}$  = Demanda media mensual de energía para ACS en el radio censal  $r$ .

$Q_{ACS(t_{ref})}$  = Consumo de agua caliente ( $\text{l/día}$ ) a la temperatura de referencia ( $40 \text{ l/persona día}$ ).

$\rho$  = Densidad del agua ( $1 \text{ Kg/l}$ ).

$C_p$  = Calor específico del agua ( $4,186.00 \text{ J/KG } ^\circ\text{C}$ )

$T_{ref}$  = Temperatura de referencia ( $55^\circ\text{C}$  según Voivontas et al., 1998)

$T_{af}$  = Temperatura del agua de cañería para el mes  $n$  ( $^\circ\text{C}$ ).

$N$  = Número de días del mes  $n$ .

$P$  = Número de personas por radio censal para la demanda energética total para ACS y Número promedio de personas por vivienda de radios censales, para la estimación del factor  $f$ .

Para la obtención del mapa de demanda energética total para ACS, se consideró el número de habitantes a nivel de radio censal (unidad mínima de relevamiento espacial adoptada por INDEC, para el relevamiento de variables socio-económicas del censo nacional de hogares de 2010). La información empleada corresponde a la base de datos de INDEC (2010) basada en el Censo Nacional de Hogares de 2010. Para la construcción del SIG, se trabajó en un formato vectorial de almacenamiento digital denominado .shape, que permite almacenar la localización de elementos geográficos (radios censales, ente caso) y los atributos asociados a ellos.

### *Correlación f-chart*

El potencial mensual de cobertura de la demanda energética para ACS mediante el uso de energía solar térmica se calculó mediante el método f-chart (Duffie y Beckman, 2013) en un SIG. Las entradas

para el método son: 1) radiación solar promedio mensual recibida por el plano inclinado del colector solar, 2) demanda energética para ACS 3) características técnicas de la instalación solar térmica, para este caso un calefón solar (Tabla 2), y 4) temperatura ambiente media mensual.

$Fr \times U_L$	1.4 (W m <sup>-2</sup> °C <sup>-1</sup> )
$Fr \times (\tau\alpha) n$	0.7
Área de colección	3.22 m <sup>2</sup>
$\beta$	$\theta + 15$

Tabla 2. Parámetros técnicos del calefón solar

El método interrelaciona la demanda de energía y el potencial de energía solar para un determinado sitio geográfico, y considera que las pérdidas en transporte y acumulación en base mensual son despreciables con respecto a la energía solar útil captada por el colector solar. El porcentaje de la demanda energética de ACS cubierta por el recurso solar se denomina fracción solar  $f$  y es función de los parámetros adimensionales  $x$  e  $y$ . La relación entre los parámetros adimensionales para sistemas térmicos de calentamiento de agua es la siguiente:

$$f = 1.029 Y - 0.065 X - 0.245 Y^2 + 0.0018 X^2 + 0.0215 Y^3$$

Donde:

$$X = \frac{A_C F'_R U_L (T_{ref} - T_a) \Delta t}{D_{ACS}} \quad (7)$$

$$Y = \frac{A_C F'_R (\tau\alpha) H_T N}{D_{ACS}} \quad (8)$$

$A_C$  = Área de colección (m<sup>2</sup>)

$F'_R$  = Factor de eficiencia del colector solar

$U_L$  = Coeficiente de pérdida del colector solar (W/m<sup>2</sup>°C)

$\Delta t$  = Segundos del mes  $n$

$T_a$  = Temperatura media mensual del mes  $n$  (°C)

$T_{ref}$  = Temperatura de referencia (100 °C)

$H_T$  = Radiación media mensual en la superficie inclinada del colector solar (J/m<sup>2</sup>)

$\tau\alpha$  = producto medio mensual de la transmitancia y absortancia

$N$  = Días del mes  $n$

#### Radiación solar sobre superficie inclinada

Entre los factores más importantes que influyen en la radiación solar que llega a una superficie horizontal o inclinada en una región se encuentran: la latitud y la duración de la insolación. La cantidad de energía disponible para el calentamiento para agua de consumo sanitario (ACS) es función de la radiación solar, del ángulo de inclinación del colector solar ( $\beta$ ) y de los parámetros técnicos del calefón solar. El ángulo de inclinación es un parámetro de diseño que permite maximizar la cantidad de radiación solar incidente en el colector solar para un período dado del año. Dicho parámetro se estimó para cada radio censal de la Provincia de Salta. Para el estudio, dado que se pretende maximizar la colección de energía durante la estación de invierno se aplicó la siguiente ecuación:

$$\beta_r = \theta + 15(1)$$

Donde:

$\beta_r$  = Angulo de inclinación (grados) para el radio censal  $r$ .

$\theta$  = Latitud (grados) del centroide del radio censal  $r$ .

Para la estimación del recurso solar sobre el plano inclinado del colector solar se partió del atlas de radiación solar de la Provincia de Salta (Sarmiento et al., 2016), que estima la radiación media mensual en el plano horizontal. La radiación solar media mensual sobre el plano inclinado del

colector se estimó conforme a la metodología propuesta por Duffie y Beckman (2013) para cielo isotrópico para los días representativos del mes n.

## RESULTADOS

### *Carga térmica unitaria (Q load)*

Como se ilustra en Figura 2, los valores de Q load se incrementan con la altitud y la amplitud térmica. La energía necesaria para calentar el agua en las regiones de clima cálido (ecorregión de Chaco) es significativamente menor que en climas fríos (ecorregión de Puna y Prepuna).

El rango de variación de Qload para el mes tipo de invierno es de  $1.70e+5$  J -  $2.96e+5$  J, mientras que el rango de variación de Qload para el mes tipo de verano es de  $1.7e+4$  J -  $9.82e+4$  J. Dado que Q load es una función de la amplitud térmica mensual y la temperatura del agua de cañería, se encontró que la región de Puna y Prepuna de la Provincia de Salta poseen los máximos valores de Qload (séptimo a decimo quintil). La región de Chaco se corresponde con el rango de valores de Qload pertenecientes al quintil uno, dos, tres y cuatro. Los valores intermedios del indicador se corresponden con las regiones de clima templado, en los que la densidad poblacional es alta.

### *Demanda energética para ACS en la Provincia de Salta*

El ranking de la demanda energética anual para ACS de los departamentos de la Provincia de Salta se presenta en la Tabla 3. Los departamentos en los que el indicador adquiere valores máximos son: Capital, General José de San Martín y Orán. La evolución mensual de la demanda energética para calentamiento de ACS (J/mes) de los departamentos con máximo y mínimo consumo, se presentan en la Figura 3 y Figura 4, respectivamente.

Los valores máximos de demanda energética, en todas las estaciones, se presentan en los centros urbanos de la Provincia de Salta (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y Figura 5). Estas regiones se caracterizan por poseer climas cálidos y valores de Q load comprendidos entre el primer y sexto quintil. En las regiones con clima frío (ecorregión de Puna), la demanda energética presenta valores mínimos, asociados a la baja densidad poblacional de los radios censales rurales. Mientras que los valores de Q load se encuentran comprendidos entre el séptimo y decimo quintil. En términos generales se observa que el efecto de las condiciones climáticas, evaluado a partir de Q load, se ve invertido por efecto de la densidad poblacional (Figura 5).

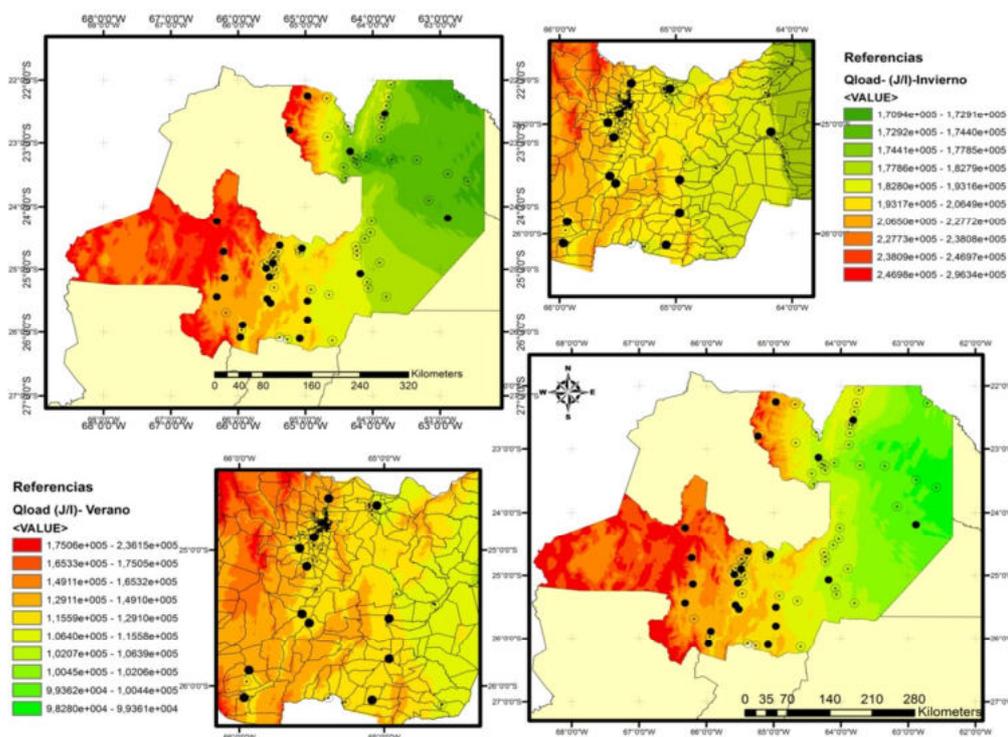


Figura 2. Q load estación de invierno y verano.

Ranking	Departamento	Demedia para ACS Mwh/mes
1	Capital	26717.65
2	General José de San Martín	6486.54
3	Orán	5790.15
4	Anta	2474.56
5	General Güemes	2205.68
6	Rosario de Lerma	1961.49
7	Metán	1884.33
8	Cerrillos	1777.54
9	Rosario de la Frontera	1372.01
10	Rivadavia	1237.51
11	Chicoana	1018.38
12	Cafayate	768.90
13	Santa Victoria	491.13
14	Cachi	457.19
15	La Caldera	393.48
16	La Viña	361.77
17	San Carlos	374.20
18	Los Andes	376.89
19	Iruya	320.68
20	Molinos	320.85
21	La Candelaria	276.92
22	Guachipas	157.57
23	La Poma	103.92

Tabla 3. Ranking de consumo energético para ACS (J/mes) para la Provincia de Salta.

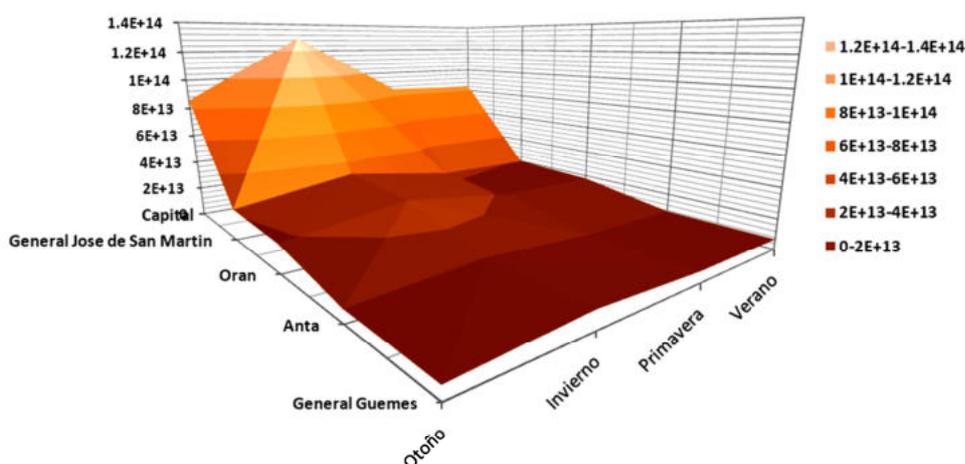


Figura 3. Evolución mensual de la demanda energética para calentamiento de ACS (J/mes) de los departamentos con máximo consumo.

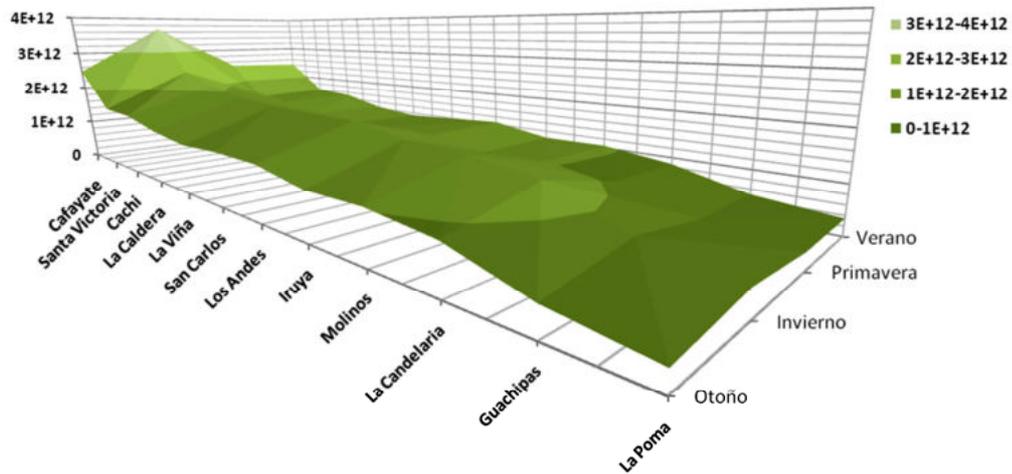


Figura 4. Evolución mensual de la demanda energética para calentamiento de ACS (J/mes) de los departamentos con medio y mínimo consumo.

*Potencial técnico de sustitución energética: la fracción solar*

La fracción solar es una métrica de rendimiento que indica cuánto de la demanda energética de una vivienda puede abastecerse con el SDHWS. El indicador se expresa como una fracción de la demanda energética, que normalmente varía entre 0 (sin SDHWS) y 1 (el uso del SDHWS permite abastecer la totalidad de la demanda energética por vivienda). Cuando la fracción solar es superior a 1, el sitio evaluado posee un recurso solar que permite cubrir más del 100% de la demanda energética con el sistema tecnológico evaluado.

Como se muestra en la Figura 6, la fracción solar presenta variaciones espaciales y temporales. En términos generales puede observarse una tendencia en el comportamiento espacial del indicador, que resulta común para todas las estaciones del año. La fracción solar presenta, durante todo el año, valores máximos (séptimo a décimo decil) en el Noroeste de la Provincia de Salta. Dichos valores decrecen en sentido oeste-este, hasta alcanzar los valores mínimos (primer a tercer decil) en la región templada del centro de la provincia. Para la estación de invierno el rango de fracción solar es máximo (0.93-1.05) en las regiones de Puna y Prepuna (Noroeste de la Provincia de Salta). Mientras que en la región central de la Provincia de Salta, se presentan los valores mínimos de fracción solar (0.34-0.77). En la región Noreste el indicador adquiere valores intermedios del orden del 0.78 a 0.92. La variación espacial del indicador refleja el efecto conjunto de la disponibilidad del recurso solar y de la densidad poblacional sobre el indicador Q load.

Dependiendo de la densidad poblacional, condiciones climáticas y el nivel de recurso solar, durante el año, es posible observar que para un idéntico punto geográfico, existe una variación considerable en la fracción solar mes a mes. Por ejemplo, en la Región Central de la Provincia de Salta, la fracción solar adquiere valores comprendidos en un rango de 0.34 a 0.77 en junio, mientras que para el mes de diciembre los valores se encuentran en el rango de 0.68 a 1.19.

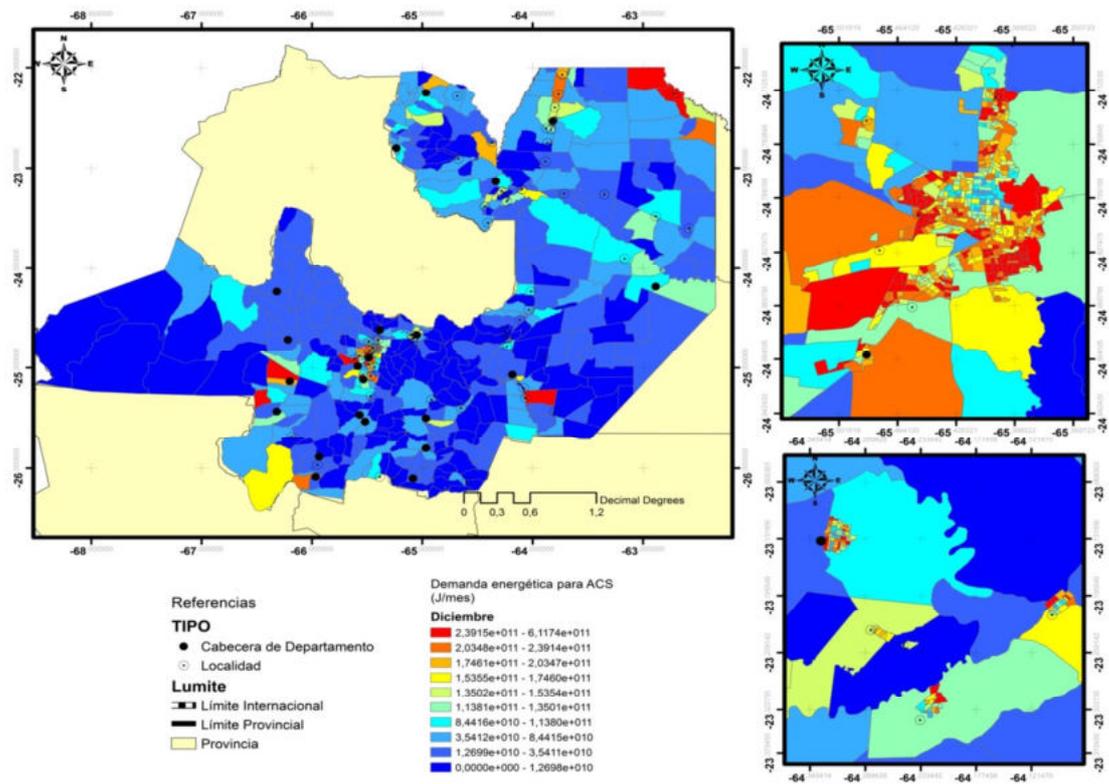


Figura 5. Demanda energética para ACS (J/mes), a nivel de radio censal para el mes tipo de verano.

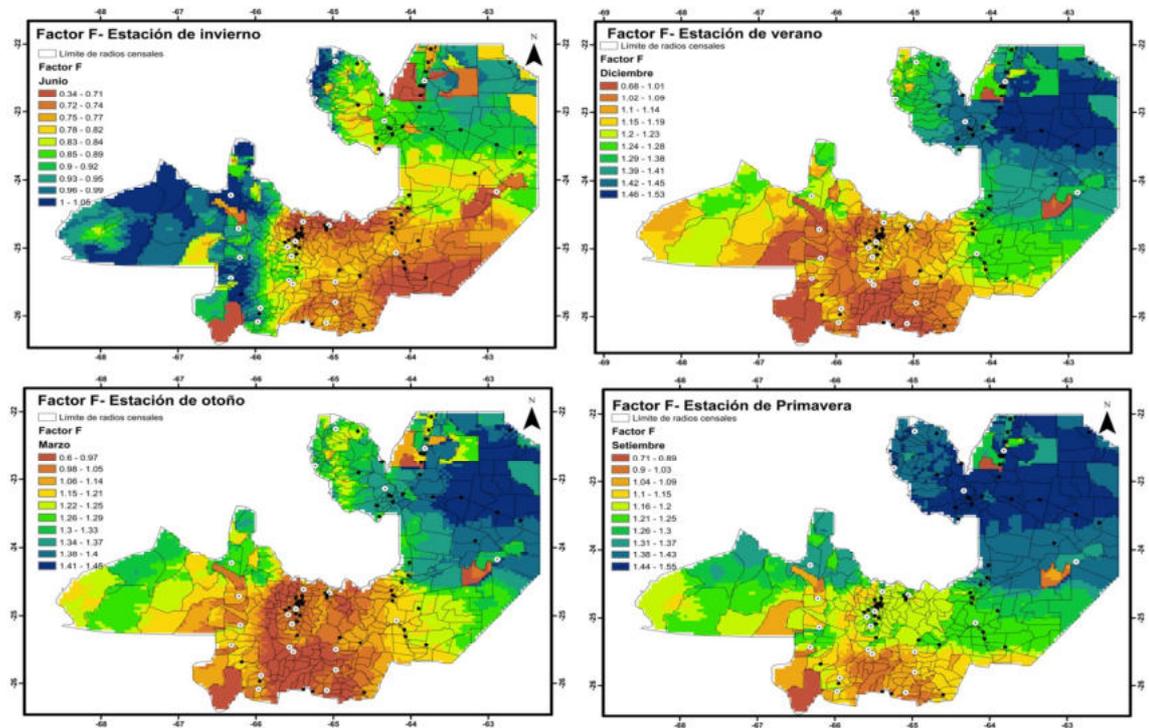


Figura 6. Factor  $f$  de la Provincia de Salta, calculado para cada estación del año.

## CONCLUSIÓN

La adopción del entorno GIS proporciona una nueva visión espacial de los resultados obtenidos por el método f-chart, permitiendo extender su aplicación a un nivel de análisis macro (nivel regional) pero con un nivel de detalle micro. Se demostró que es posible yuxtaponer la heterogeneidad espacial y temporal de las variables fisiográficas, climáticas y demográficas del territorio, integrándolas en un indicador de sencilla interpretación.

Para el estudio de caso evaluado, se encontró que el efecto de las condiciones climáticas, evaluado a partir de Q load, se ve invertido por efecto de la densidad poblacional en el análisis de demanda energética. Mientras que el factor f, evidencia el efecto de la disponibilidad del recurso solar sobre la demanda energética.

Los mapas del factor f indican el máximo nivel abastecimiento de la demanda energética que es posible cubrir con el recurso solar disponible, para cada estación del año y con un nivel de detalle de radio censal. El factor f, refleja por lo tanto el máximo nivel de sustitución energética que es posible alcanzar para el uso final analizado. El SIG generado puede conceptualizarse como un sistema de soporte a las decisiones, con potencial para coadyuvar en la formulación de políticas energéticas regionales de implementación de SDHWS. A futuro, será posible evaluar ex ante el ahorro energético generado a partir de la implementación de SDHWS y estimar la reducción del impacto ambiental derivado.

Es factible emplear el sistema de soporte a las decisiones generado en este trabajo, para definir políticas energéticas de sustitución. Sin embargo, aún cuando se ha seguido rigurosamente la aplicación del método f chart es preciso tener en cuenta las limitaciones de los modelos aplicados y las fuentes de datos utilizadas como imput.

Se demostró que la Provincia de Salta presenta un buen potencial técnico para la implementación de SDHWS, permitiendo cubrir, en algunas regiones y épocas del año, más del 100% de la demanda energética. En general, los sitios con factor f mayores a 1, pueden asociarse a regiones con elevada disponibilidad de recurso solar y baja densidad poblacional. Este aspecto resulta relevante, dado que se trabajó en base a datos del INDEC correspondientes al año 2010 y no se incorporó en este estudio el crecimiento demográfico. A futuro, es de esperar que los crecimientos en la demanda energética puedan ser abastecidos mediante energía solar térmica.

## REFERENCIAS

- Altobelli F., Condorí M., Durán G. y C. Martínez. 2014. Solar dryer efficiency considering the total drying potential. Application of this potential as a resource indicator in north-western Argentina. *Solar Energy* 105 (2014) 742–759.
- Bezzo, E, Bermejo A., Cozza P., Fiora J., Gil S., Maubro S. y R. Prieto Impacto de Los Consumos Pasivos En Artefactos a Gas En El Consumo de Energía. [http://apiperu.com.pe/argentina/trabajos/ECC\\_172\\_Gil\\_Salvador.pdf](http://apiperu.com.pe/argentina/trabajos/ECC_172_Gil_Salvador.pdf)
- Cassard, H., Denholm P. y S. Ong. 2011. “Technical and Economic Performance of Residential Solar Water Heating in the United States.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15(8): 3789–3800. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S136403211100253X>
- Chandrasekar, B., y T.C. Kandpal. 2004. “Techno-Economic Evaluation of Domestic Solar Water Heating Systems in India.” *Renewable Energy* 29(3): 319–32.
- CANMET ENERGY (2001) Solar water heating project analysis. Minister of Natural Resources Canada. Ottawa.
- Duffie, John A., y William A. Beckman. 2013. *Solar Engineering of Thermal Processes*. Wiley.
- Gil, S., y J. Deferrari. 2004. “Generalized Model of Prediction of Natural Gas Consumption.” *Journal of Energy Resources Technology* 126(2): 90. <http://energyresources.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1414323>.

- Ibrahim, Oussama, Farouk Fardoun, Rafic Younes, y Hasna Louahlia-Gualous. 2014. Review of Water-Heating Systems: General Selection Approach Based on Energy and Environmental Aspects. *Building and Environment* 72: 259–86.
- Kalogirou, Soteris A. 2004. Environmental Benefits of Domestic Solar Energy Systems. *Energy Conversion and Management* 45(18–19): 3075–92.
- Lannelli L.; Prieto R. y S. Salvador. 2016. Eficiencia en El Calentamiento de Agua - Consumos Pasivos. *Petrotecnia* 86-95.
- Pillai, Indu R., y B. Rangan . 2007. Methodology for Estimation of Potential for Solar Water Heating in a Target Area. *Solar Energy* 81(2): 162–72. Ramachandra, T.V., 2009. RIEP: regional integrated energy plan. *Renew. Sust. Energy Rev.* 13, 285–317.
- Voivontas, D., G. Tsiligiridis, y D. Assimacopoulos. 1998. Solar Potential for Water Heating Explored by GIS. *Solar Energy* 62(6): 419–27.
- Sarmiento N., Belmonte S., Franco J., Dellicompagni. P. y K. Escalante. 2017. Towards a Support Decision System: a Solar Radiation Atlas for the Province of Salta. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*

## **ABSTRACT**

The energy demand for heating water for sanitary consumption represents a significant proportion of the residential consumption of gas and electricity. Solar water heating systems have potential to supply such demand, but their regional implementation requires the formulation of energy policies based on the estimation of solar potential and the evaluation of energy demand. We present a study of the potential of substitution of conventional sources for solar thermal, to supply the energy demand of residential sanitary water. The substitution is evaluated based on a technical potential applying the f-chart method and a unit thermal load indicator, developed in a geographic information systems environment. We obtained maps of unit thermal load, energy demand and technical substitution potential. The obtained results constitute a system of support to the decisions that will allow to plan the sustainable implementation of solar systems of water heating.

**Keywords:** Solar water heating systems, energy substitution, technical substitution potential, sanitary water, energy planning, f-chart