

# Caracterización fisicoquímica de arenas en el distrito de San Juan Bautista y su potencial uso en la fabricación de celdas solares

## Physicochemical characterization of sand types in the district of San Juan Bautista and its potential use in the manufacture of solar cells

Trigoso V. R.<sup>1</sup>, Rojas A. J. M.<sup>2</sup>, Silveira B. M. I.<sup>3</sup>, Gómez T. L.<sup>2</sup>,  
Ruiz M. W.<sup>2</sup>, Lozano M. B.<sup>2</sup>, Arce H. J.<sup>2</sup> y Ríos R. J.<sup>2</sup>

Recibido: noviembre 2012

Aceptado: diciembre 2012

### RESUMEN

Esta investigación se desarrolló en la ciudad de Iquitos entre los años 2010 y 2011, por la necesidad imperativa de aprovechar los recursos naturales existentes en la comunidad de San Juan Bautista, mediante la caracterización fisicoquímica de arenas observadas en cinco canteras de esta comunidad. Los análisis realizados fueron con vistas a un potencial uso como materia prima en la fabricación de celdas solares. La caracterización fisicoquímica mostró que las arenas analizadas tienen elevada pureza en SiO<sub>2</sub>, siendo los resultados más relevantes los de la cantera n.º 3: humedad (4,732%), SiO<sub>2</sub> (99,071%), densidad (1,5 g/cm<sup>3</sup>). Los análisis realizados por fluorescencia de rayos X de energía dispersiva, corroboraron la pureza de SiO<sub>2</sub> obteniéndose 96,30%. Ensayos de obtención de silicio puro realizados con el SiO<sub>2</sub> obtenido de estas arenas, se realizaron por dos métodos diferentes y mostraron que mediante el método de reducción de óxido de silicio (SiO<sub>2</sub>) con tetraborato de sodio (Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>), presenta una pureza de silicio de 90% y mediante el método de reducción carbotérmica, una pureza de grado metalúrgico semejante a la comparada en la bibliografía (99%). Estos resultados demuestran que es posible utilizar las arenas de esta región para obtener silicio puro, obleas y celdas solares.

**Palabras claves:** recursos naturales, energía eléctrica, arena, celdas solares, paneles solares, fluorescencia de rayos X de energía dispersiva, San Juan Bautista, región Loreto.

### ABSTRACT

This research was developed in the city of Iquitos between 2010 and 2011. It was due to the imperative need to exploit the natural resources in San Juan Bautista community by physicochemical characterization of sand types that were observed in five quarries in this community. Analyses were performed with a view to a potential use as feedstock in the manufacture of solar cells. The physicochemical characterization showed that the sand types have high purity analyzed in SiO<sub>2</sub>, the most relevant results as follows: quarry n.º 3, humidity (4,732%), SiO<sub>2</sub> (99,071%), density (1,5 g/cm<sup>3</sup>). The analysis by X-ray fluorescence energy dispersive corroborated this purity of obtaining SiO<sub>2</sub> 96,30%. Obtaining assays performed with pure silicon SiO<sub>2</sub> obtained from these sands were performed by two different methods showed that the reduction method using silicon oxide (SiO<sub>2</sub>) with sodium tetra borate (Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>), purity 90% silicon and by carbothermal reduction method purity metallurgical grade, like comparative in the literature (99%). These results show that it is possible to use the different types of sand of this region for pure silicon wafer sand solar cells.

**Key words:** natural resources, electrical energy, sand, solar cells, solar paddles, X-ray fluorescence of dispersive energy, San Juan Bautista, Loreto region.

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería Química. Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP). Las Castañas 271, Iquitos, Perú. rafael\_trigoso@hotmail.com

<sup>2</sup> Facultad de Ingeniería Química. UNAP. Iquitos, Perú.

<sup>3</sup> Instituto de Química de la Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Brasil.

## INTRODUCCIÓN

La coyuntura energética, medioambiental y política mundial actual, con un consumo de energía per cápita en constante aumento basado esencialmente en combustibles fósiles, que incrementa problemas ambientales y un agotamiento de los yacimientos de combustibles fósiles, y la inestabilidad en precios basados en factores políticos y especulativos, han llevado a un incremento de precios sin precedentes (Bernreuter, 2004), convirtiendo la búsqueda de energías renovables en un objetivo prioritario. La inversión de la Unión Europea en investigación y desarrollo en el sector fotovoltaico creció grandemente (Castro, 2009). Entre las energías renovables, la energía solar lleva varias décadas en la agenda de los centros de investigación. La crisis del petróleo de 1973, fue la causa que acrecentó la investigación de la energía fotovoltaica, buscando aumento de eficiencia y reducción de costos, la misma que presenta ventajas frente a los combustibles fósiles, como son las ambientales, por la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (Bernreuter, 2004), comparativamente de 750-900g CO<sub>2</sub>eq/kWh del carbón, 400g CO<sub>2</sub>eq/kWh de una turbina de ciclo combinado y 454g CO<sub>2</sub>eq/kWh en la mezcla europea de electricidad en 2007 (Rosales et al., 1999).

Según el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), de la población en edad escolar en las comunidades indígenas, el 67% se encuentra en algún grado de primaria, el 7% accede al nivel secundario y el 26% se encuentra fuera del sistema educativo por falta de energía eléctrica, debido al mínimo apoyo estatal (Pro & Contra, 2009).

Ante esta problemática, un grupo de investigadores de la Facultad de Ingeniería Química plantearon el problema de la

manera siguiente: ¿Será posible aprovechar las arenas con alto contenido de SiO<sub>2</sub> de las canteras de San Juan Bautista para obtener silicio puro, obleas y celdas solares luego de un tratamiento fisicoquímico adecuado, a fin de aprovechar la energía fotovoltaica?

Las celdas solares son dispositivos de gran importancia para producir la energía solar en eléctrica. Dispositivos de cristal que transforman la energía solar directamente en electricidad; las celdas solares se usan para suministrar energía a objetos como calculadoras de bolsillo o satélites (Kerrod, 2004).

A fines del siglo XIX, científicos tales como W. Smith, W. Adas y R. Day descubrieron la fotoconductividad del selenio y construyeron la primera celda experimental hecha de una oblea de selenio. En 1904, Albert Einstein publica sus *papers* acerca del efecto fotovoltaico y de la teoría de la relatividad. La compañía Western Electric fue la primera en comercializar las celdas solares en 1955 (Pereda, 2005). En 1960, Hoffman Electronics consiguió fabricar una celda con un 14% de eficiencia. En la década de los sesenta, la potencia instalada de las celdas solares de las naves espaciales y satélites alcanzaron a 1 kW. En 1973, se produjo el embargo de petróleo impuesto por la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEC), con lo cual se inicia una política de investigación del uso de celdas solares en la Tierra.

El Centro de Energías Renovables de la Universidad Nacional de Ingeniería (Ceruni) está ejecutando desde 1996 un proyecto piloto de electrificación fotovoltaica en la comunidad insular de Taquile en el lago Titicaca (Puno) (Horn, 2006a). El proyecto GEF-MEM "Electrificación rural sobre la base de energía fotovoltaica en el Perú", cuya meta es la instalación de 7500 sistemas fotovoltaicos, en especial en la selva. El

proyecto de la cooperación técnica alemana que instaló en 1986-1996 en el departamento Puno cerca de 500 paneles, en un marco "precomercial". El Ministerio de Energía y Minas (MEM) con la instalación entre 1995 y 1998 de un total de 1500 paneles en diferentes regiones del Perú; estos paneles son propiedad de la empresa estatal Adinelsa, quien la administra con un modelo tarifario (Horn, 2006b).

La preocupación por el cambio climático, así como por el incremento de los precios de los combustibles fósiles, está fomentando el desarrollo de fuentes renovables de energía y en particular el uso de la energía solar fotovoltaica (CIEMAT/IALE Tecnología, 2009).

Según Antony *et al.* (2006), en España, un promedio de 1500 kW/m<sup>2</sup>/año de radiación solar equivale a 150 litros/m<sup>2</sup>/año de petróleo.

En el Perú, comparado con otros países, existen todavía pocos sistemas fotovoltaicos (SFV): hasta 2005, en el Perú hay alrededor de 10 000 SFV instalados, con una potencia total de 1,5 MWp. El 65% de esta potencia corresponde a SFV para telecomunicaciones, 29% para iluminación interna a casas, incluyendo postas de salud, salas comunales, etc., y el resto para otros usos (refrigeración, bombeo de agua, etc.) (Perú Económico, 2006).

En el proceso Siemens, el silicio producido por este y otros métodos similares se denomina silicio policristalino y típicamente tiene una fracción de impurezas de 0,001 ppm o menor. Wacker Chemie, Hemlock y Solar Grade Silicon proponen un reactor de lecho fluidizado (Weidhaus *et al.*, 2004). Chisso Corporation y el gobierno japonés investigaron un proceso para obtener silicio, esta alternativa se desechó en los años 80 por Bayer AG ya que no se podían eliminar trazas

de metales residuales (Weidhaus *et al.*, 2004). La compañía Elkem (Kriestad *et al.*, 2004) purifica mg-Si en tres pasos de refinado relativamente simples: pirometalúrgico, hidrometalúrgico y de limpieza. Apollon Solar SAS y el Centro Nacional de Investigación Científica de Francia (CNRS, por sus siglas en francés) purificaron mg-Si con un plasma, consiguiendo células solares de un 11,7 % de eficiencia (Weidhaus *et al.*, 2004). La Universidad Nacional Técnica de Kazakh en Almaty, Kazajstán (Schmela, 2005) desarrolla otra técnica para obtener silicio puro.

La fluorescencia de rayos X de energía dispersiva (EDXRF, por sus siglas en inglés) es una técnica de análisis no destructiva (Whiston *et al.*, 1987); los rayos X son la radiación electromagnética (0,1 Å a 10 nm) producida por el frenado de electrones de elevada energía (espectro continuo) o transiciones electrónicas de electrones que se encuentran en los orbitales internos de los átomos (Rosales *et al.*, 1999); el espectro de rayos X es muy simple observándose únicamente las líneas de las emisiones K las más intensas y muy débilmente las líneas L (Leyden, 1987).

El objetivo de esta investigación fue caracterizar las arenas, aplicar métodos adecuados para obtener silicio puro, preparar las obleas y la celda solar fotovoltaica, para finalmente ensamblarla y conseguir el panel solar fotovoltaico que pueda producir energía eléctrica aprovechable en la comunidad nativa de Mishana, que se localiza en la Amazonía peruana, periodo 2010-2011.

## MATERIAL Y MÉTODO

### Muestras

Las muestras en estudio comprenden cinco canteras de arena existentes en laderas de la carretera Iquitos-Nauta, las cuales fueron

consideradas teniendo en cuenta su volumen y su ubicación.

Las técnicas e instrumentos de recolección de datos fueron:

- Técnicas: observación directa, audiovisuales, operación de calcinación directa de muestra, reacciones químicas con la muestra.
- Instrumentos de recolección de datos: ficha de apuntes y libreta de apuntes de datos, cámara fotográfica.

### Aparatos y sustancias

Para los ensayos preliminares se utilizaron: pala, bolsas plásticas, matraces Erlenmeyer, tamices, estufa, equipo de rayos X de energía dispersiva, mufla, ácido clorhídrico, ácido fluorhídrico, entre otros.

### Tipos de estudio

La investigación fue de tipo descriptivo y experimental. Descriptivo, porque se observaron y describieron diferentes técnicas para la obtención del silicio; y experimental, porque se ensayó con diversas variables para obtener silicio de alta pureza.

### Procedimiento experimental

#### • **Recolección de muestra**

Se recolectaron tres kilogramos de arena a 30, 60 y 90 cm de profundidad en cada una de las canteras seleccionadas. Para ello se utilizó la técnica de calicateo, que consiste en excavar un hoyo de 1 m de ancho, por 1 m de largo y 1 m de profundidad; asegura las paredes de los hoyos con tablones y listones debidamente confeccionados.

#### • **Análisis gravimétricos**

Se determinó la textura por el método del

higrómetro.

#### • **Clase textural**

Se determinó la cantidad de arena, limo y arcilla en función de la fracción dominante del suelo.

#### • **Análisis mecánico**

- **Por tamizado:** se usó un juego de seis tamices de 16, 20, 40, 60, 100 y talco, para hacer pasar a la muestra de 1 kg por ellas y se pesó lo que quedaba retenido en cada una de ellas para determinar su porcentaje. Este método se usa para partículas gruesas (mayores de 50 micras) con fines de investigación.

- **Por sedimentación o método de higrómetro de Bouyoucos:** se pesó 50 gramos de la muestra del suelo secado al aire (TFSA). Se colocó la muestra pesada en el vaso de dispersión del agitador mecánico, se vertió agua destilada en el vaso, dejando libre la tercera parte superior. Se agregó el agente dispersante al vaso (10 mL). Se colocó con cuidado el vaso de dispersión y se agitó durante 10 minutos en el agitador mecánico. Se transvasó la suspensión dispersada a la probeta de Bouyoucos. Se cuidó de no dejar nada en el vaso de dispersión, ayudándose con la pizeta con agua destilada. Se cogió con una mano la probeta y con la otra, se tapó la boca de dicha probeta y se agitó por varias veces. Se dejó la probeta sobre la mesa. Se anotó la hora y se colocó con cuidado el hidrómetro dentro de la probeta y se obtuvo una primera lectura al final de los 40 segundos (lectura hidrométrica y temperatura). Se dejó la probeta en reposo y a los 120 minutos se obtuvo una segunda lectura. Se tomó la tempera-

tura de la suspensión, inmediatamente después de cada lectura del hidrómetro.

### Medidas de espectros de fluorescencia de rayos X de energía dispersiva

Las medidas fueron realizadas en las arenas con el equipo instrumental correspondiente. Las arenas fueron homogenizadas y colocadas en el frasco especial para ser irradiados por los rayos característicos de energía.

### Obtención de silicio

#### • Método 1-variante

El procedimiento consiste en calcinar a la muestra de arena previamente digerida con HCl y HNO<sub>3</sub> 3M a 200 °C, calcinando sin sacar a la muestra de la mufla a 800 °C durante periodos de 5, 3 y 2 horas, obteniéndose al final cristales que observados al microscopio con cámara incorporada, se corroboraron al contrastarse con cristales de silicio monocristalino de la bibliografía por la semejanza física, en cuanto a color y forma de cristales.

#### • Método 2

Consistió en tratar a la muestra limpia y seca de arena con hipoclorito de sodio. Se secó y se sometió a dicha muestra a molienda y a tamizado por la malla n.º 100 ASTM. Luego en una mufla se sometió al óxido de silicio a 1200 °C, utilizando como fundente el tetraborato de sodio. Después de esta reacción, producto secundario CaO, se lavó con HCl 0,1 N, se continuó lavando con agua destilada hasta dejar libre al silicio. Finalmente, se llevó al silicio a 1800 °C.

#### • Análisis de datos

En el presente proyecto se utilizó la planilla electrónica Excel para el tratamiento estadístico descriptivo de los datos y el programa AutoCAD 10 en la elaboración del plano de ubicación de las canteras.

## RESULTADOS

Las figuras 1, 2, 3, 4 y 5 muestran los lugares de recolección que comprende cinco canteras de arena existentes en las laderas de la carretera Iquitos-Nauta.

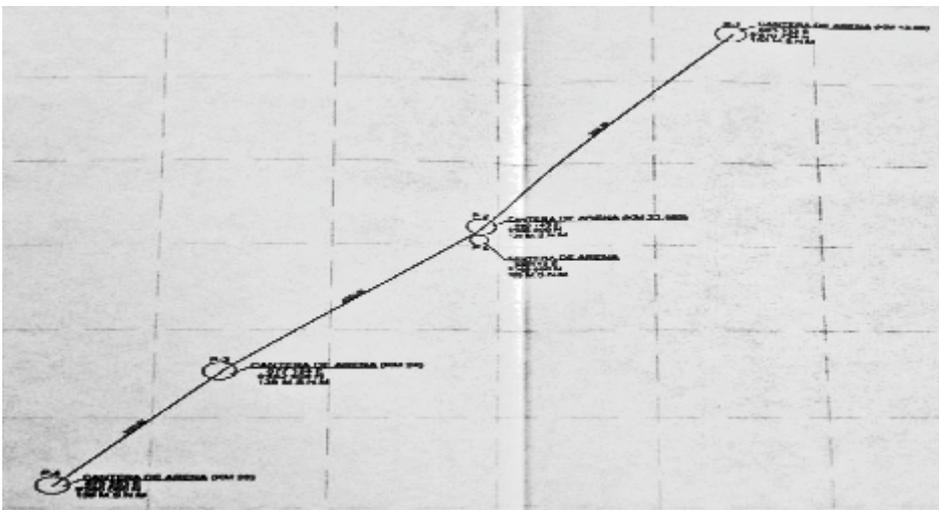


Figura 1. Ubicación de las canteras a lo largo de la carretera Iquitos-Nauta.



Figura 2. Cantera 1.



Figura 3. Cantera 2.



Figura 4. Cantera 3.



Figura 5. Cantera 4.

Las tablas 1 y 2 muestran las coordenadas de las canteras de arena identificadas y de los posibles puntos para instalar paneles solares

respectivamente. En tanto, la tabla 3 presenta la determinación de la densidad de las muestras de arena por calicatas.

**Tabla 1.** Coordenadas en UTM y geográficas de las canteras de arena identificadas en la carretera Iquitos-Nauta.

| Puntos | COORDENADAS EN UTM |            | GEOGRÁFICAS      |                   |
|--------|--------------------|------------|------------------|-------------------|
|        | Este               | Norte      | Latitud          | Longitud          |
| P-1    | 683 322E           | 9 570 734N | 3° 52' 55,29502" | 73° 20' 56,38581" |
| P-2    | 680 143E           | 9 566 009N | 3° 55' 29,32077" | 73° 22' 39,13104" |
| P-3    | 677 124E           | 9 562 606N | 3° 57' 20,29805" | 73° 24' 16,78071" |
| P-4    | 675 163E           | 9 570 060N | 3° 58' 43,30224" | 73° 25' 16,95047" |
| P-5    | 680 113E           | 9 565 688N | 3° 55' 39,77302" | 73° 22' 40,08330" |

**Tabla 2.** Coordenadas en UTM y geográficas de posibles puntos para instalar paneles solares en la comunidad de Mishana.

| Puntos | COORDENADAS EN UTM |           | GEOGRÁFICAS      |                   |
|--------|--------------------|-----------|------------------|-------------------|
|        | Este               | Norte     | Latitud          | Longitud          |
| P-1    | 667 390E           | 9571 012N | 3° 52' 47,21225" | 73° 29' 32,81840" |
| P-2    | 667 416E           | 9570 966N | 3° 52' 48,70839" | 73° 29' 31,97295" |
| P-3    | 667 482E           | 9570 878N | 3° 52' 51,56962" | 73° 29' 29,82849" |
| P-4    | 667 536E           | 9570 782N | 3° 52' 54,69200" | 73° 29' 28,07254" |
| P-5    | 667 630E           | 9570 660N | 3° 52' 58,65855" | 73° 29' 25,01849" |
| P-6    | 667 347E           | 9570 884N | 3° 52' 51,38211" | 73° 29' 34,20484" |
| P-7    | 667 369E           | 9570 772N | 3° 52' 55,02727" | 73° 29' 33,48525" |
| P-8    | 667 467E           | 9570 798N | 3° 52' 54,17509" | 73° 29' 30,31009" |

**Tabla 3.** Determinación de la densidad de las muestras de arena por calicatas.

| Calicata | Estrato/cm | Peso probeta + muestra/g | Peso de la muestra/g | Volumen de la muestra cm <sup>3</sup> | Densidad (g/cm <sup>3</sup> ) |
|----------|------------|--------------------------|----------------------|---------------------------------------|-------------------------------|
| 1        | 30         | 36,2                     | 1,3                  | 1,0                                   | 1,3                           |
|          | 60         | 36,2                     | 1,3                  | 1,0                                   | 1,3                           |
|          | 90         | 36,2                     | 1,3                  | 1,0                                   | 1,3                           |
| 2        | 30         | 36,3                     | 1,4                  | 1,0                                   | 1,4                           |
|          | 60         | 36,4                     | 1,5                  | 1,0                                   | 1,5                           |
|          | 90         | 36,4                     | 1,5                  | 1,0                                   | 1,5                           |
| 3        | 30         | 36,4                     | 1,5                  | 1,0                                   | 1,5                           |
|          | 60         | 36,4                     | 1,5                  | 1,0                                   | 1,5                           |
|          | 90         | 36,4                     | 1,5                  | 1,0                                   | 1,5                           |
| 4        | 30         | 36,5                     | 1,6                  | 1,0                                   | 1,6                           |
|          | 60         | 36,4                     | 1,5                  | 1,0                                   | 1,5                           |
|          | 90         | 36,5                     | 1,6                  | 1,0                                   | 1,6                           |
| 5        | 30         | 36,3                     | 1,4                  | 1,0                                   | 1,4                           |

Peso de la probeta vacía: 34,9 g.

El porcentaje de humedad, impurezas y de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) de cada una de las muestras recolectadas se detalla en las tablas 4, 5 y 6.

En tanto, la tabla 7 presenta los análisis físico-mecánicos de las arenas de las diferentes canteras.

**Tabla 4.** Porcentaje de humedad de las arenas recolectadas de las diferentes calicatas.

| Calicata | Estrato<br>cm | Peso del crisol en g |                     |                   |                   | Humedad | % de<br>humedad |
|----------|---------------|----------------------|---------------------|-------------------|-------------------|---------|-----------------|
|          |               | Vacío                | + Muestra<br>húmeda | + Muestra<br>seca | Muestra<br>húmeda |         |                 |
| 1        | 30            | 24,6470              | 47,0874             | 45,5711           | 22,4404           | 1,5163  | 6,757           |
|          | 60            | 23,8379              | 48,6838             | 47,3337           | 24,8459           | 1,3501  | 5,434           |
|          | 90            | 25,3336              | 54,9402             | 53,1226           | 29,6066           | 1,8176  | 6,139           |
| 2        | 30            | 23,9896              | 43,6130             | 42,7192           | 19,6234           | 0,8938  | 4,555           |
|          | 60            | 23,0747              | 43,5099             | 42,4486           | 20,4352           | 1,0613  | 5,193           |
|          | 90            | 23,1685              | 44,8556             | 43,8949           | 21,6871           | 0,9607  | 4,430           |
| 3        | 30            | 74,3460              | 102,1072            | 100,9423          | 27,7612           | 1,1649  | 4,196           |
|          | 60            | 24,0889              | 49,3949             | 48,1554           | 25,3060           | 1,2395  | 4,898           |
|          | 90            | 62,0128              | 102,7956            | 100,7153          | 40,7828           | 2,0803  | 5,101           |
| 4        | 30            | 21,3861              | 46,6370             | 45,3375           | 25,2509           | 1,2995  | 5,146           |
|          | 60            | 22,7351              | 45,9247             | 44,8423           | 23,1896           | 1,0824  | 4,668           |
|          | 90            | 23,7694              | 46,3627             | 45,2827           | 22,5933           | 1,0800  | 4,780           |
| 5        | 30            | 58,8999              | 111,4352            | 102,2969          | 52,5353           | 9,1383  | 17,395          |

**Tabla 5.** Determinación de impurezas de las muestras homogéneas por calicatas.

| Calicata | Peso muestra<br>tratada (g) | Peso muestra seca (g)<br>(después de tratarla con<br>HCl al 26% y lavarla) | Impurezas (g) |
|----------|-----------------------------|--|---------------|
| 1        | 100,0036                    | 88,2437  | 11,7599       |
| 2        | 100,0131                    | 93,2714  | 6,7417        |
| 3        | 100,0054                    | 90,3961  | 9,6093        |
| 4        | 100,0015                    | 85,3912  | 14,6103       |
| 5        | 100,0000                    | 88,7978  | 11,2022       |

**Tabla 6.** Porcentaje de sílice (SiO<sub>2</sub>) por método gravimétrico de las arenas recolectadas de las diferentes canteras.

| Calicata | Estrato<br>cm | Peso del crisol en g |                     |                   |                   |                 | % de<br>(SiO <sub>2</sub> ) |
|----------|---------------|----------------------|---------------------|-------------------|-------------------|-----------------|-----------------------------|
|          |               | Vacío                | + Muestra<br>húmeda | + Muestra<br>seca | Muestra<br>húmeda | Muestra<br>seca |                             |
| 1        | 30            | 43,8551              | 53,4291             | 52,8785           | 9,5740            | 9,0234          | 94,249                      |
|          | 60            | 17,1086              | 28,4010             | 28,0908           | 11,2924           | 10,9822         | 97,253                      |
|          | 90            | 14,2141              | 24,2195             | 23,9694           | 10,0054           | 9,7553          | 97,500                      |
| 2        | 30            | 21,3861              | 45,3375             | 44,8391           | 23,9514           | 23,453          | 97,919                      |
|          | 60            | 22,7321              | 44,8423             | 44,2849           | 22,1102           | 21,5528         | 97,479                      |
|          | 90            | 23,7694              | 45,2827             | 44,5741           | 21,5133           | 20,8047         | 96,706                      |
| 3        | 30            | 24,5992              | 36,9458             | 37,7138           | 12,3466           | 12,1142         | 98,121                      |
|          | 60            | 23,8293              | 35,5184             | 35,4161           | 11,6891           | 11,5868         | 99,125                      |
|          | 90            | 23,5752              | 34,6062             | 34,6025           | 11,0310           | 11,0273         | 99,966                      |
| 4        | 30            | 23,1993              | 38,3444             | 38,0675           | 15,1451           | 14,8682         | 98,172                      |
|          | 60            | 23,7268              | 35,5786             | 35,4477           | 11,8518           | 11,7209         | 98,869                      |
|          | 90            | 17,0778              | 32,0036             | 31,6408           | 14,9258           | 14,563          | 97,569                      |
| 5        | 30            | 14,1374              | 25,0592             | 24,6892           | 10,9218           | 10,5518         | 96,612                      |

**Tabla 7.** Análisis fisicomecánicos de las arenas de las diferentes canteras.

| Calicata | Estrato<br>/cm | Parámetro<br>fisicomecánico (%) |         |       | Análisis gravimétrico<br>Número de malla (A.S.T.M./g) |       |        |        |        | Clasifi-<br>cación |              |
|----------|----------------|---------------------------------|---------|-------|---|-------|--------|--------|--------|--------------------|--------------|
|          |                | Arena                           | Arcilla | Limo  | 16  | 20    | 40     | 60     | 100    |                    | Talco        |
| 01       | 30             | 85,24                           | 4,76    | 10,00 | 2,50  | 8,40  | 7,00   | 479,20 | 479,20 | 73,40              | Arena franca |
|          | 60             | 85,24                           | 6,76    | 12,00 | 5,20  | 8,20  | 317,00 | 450,00 | 450,00 | 93,90              |              |
|          | 90             | 89,24                           | 4,76    | 6,00  | 9,10  | 5,70  | 451,20 | 450,10 | 450,10 | 6,00               |              |
| 02       | 30             | 85,24                           | 4,76    | 10,00 | 4,10  | 6,20  | 540,10 | 287,30 | 69,50  | 92,80              |              |
|          | 60             | 87,44                           | 5,96    | 6,60  | 8,40  | 10,09 | 479,05 | 365,56 | 66,70  | 70,20              |              |
|          | 90             | 81,24                           | 4,76    | 12,00 | 4,40  | 4,10  | 304,00 | 351,20 | 122,90 | 213,40             |              |
| 03       | 30             | 89,24                           | 4,76    | 6,00  | 39,10   | 31,90 | 550,30 | 207,20 | 120,80 | 50,07              |              |
|          | 60             | 87,44                           | 5,96    | 4,60  | 25,90   | 18,50 | 677,10 | 70,30  | 169,40 | 38,80              |              |
|          | 90             | 89,24                           | 4,76    | 6,00  | 27,10   | 22,10 | 520,50 | 266,00 | 118,70 | 45,60              |              |
| 04       | 30             | 90,04                           | 5,96    | 4,00  | 2,10  | 2,30  | 400,20 | 450,10 | 97,60  | 47,70              |              |
|          | 60             | 87,24                           | 4,76    | 8,00  | 3,10  | 3,10  | 420,20 | 446,60 | 67,50  | 59,50              |              |
|          | 90             | 87,24                           | 4,76    | 8,00  | 5,30  | 3,60  | 742,60 | 174,40 | 39,20  | 34,90              |              |

Las medidas de espectros de fluorescencia de rayos X de energía dispersiva fueron efectuadas en las condiciones que se indican en las tablas 8 y 9. En tanto, en la

tabla 10 se presentan los resultados cuantitativos de la composición química de la muestra homogénea de la calicata 3, por difracción de rayos X de energía dispersiva.

**Tabla 8.** Condiciones de irradiación A de la muestra de arena homogénea de la calicata 3.

| Condiciones de irradiación   |
|--|
| IRRADIACIÓN 1:<br>1) Voltaje aplicado a un tubo de rayos X: 50 kV<br>2) Atmósfera de irradiación: vacío (50 Pa)<br>3) Tiempo de irradiación: 1000 s<br>4) Corriente en el tubo de rayos X: 27 $\mu$ A<br>5) Tiempo en blanco del detector: 25% |

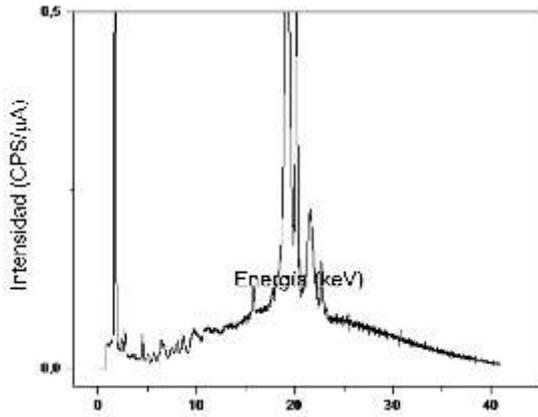
**Tabla 9.** Condiciones de irradiación B de las muestras homogéneas de arenas de la calicata 3.

| Condiciones de irradiación  |
|---|
| IRRADIACIÓN 2:<br>1) Voltaje aplicado a un tubo de rayos X: 15 kV<br>2) Atmósfera de irradiación: vacío (50 Pa)<br>3) Tiempo de irradiación: 1000 s<br>4) Corriente en el tubo de rayos X: 446 $\mu$ A<br>5) Tiempo en blanco del detector: 26% |

**Tabla 10.** Resultados cuantitativos de la composición química de la muestra homogénea de la calicata 3, por difracción de rayos X de energía dispersiva.

| Analito                        | Resultados   | Std. Dev. | Proc. Calc. | Line | Int. (cps/ $\mu$ A) |
|--------------------------------|--------------|-----------|-------------|------|---------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 96,30 g/100g | (0,06)    | QUAN-FP     | SiKa | 5,7427              |
| SO <sub>3</sub>                | 1,169 g/100g | (0,009)   | QUAN-FP     | S Ka | 0,0971              |
| SO <sub>3</sub>                | 0,86 g/100g  | (0,04)    | QUAN-FP     | AlKa | 0,2912              |
| TiO <sub>2</sub>               | 0,439 g/100g | (0,009)   | QUAN-FP     | TiKa | 0,2912              |
| Cs <sub>2</sub> O              | 0,439 g/100g | (0,006)   | QUAN-FP     | CsLa | 0,0232              |
| CaO                            | 0,240 g/100g | (0,003)   | QUAN-FP     | CaKa | 0,0293              |
| Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,160 g/100g | (0,006)   | QUAN-FP     | SmLa | 0,1365              |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,13 g/100g  | (0,01)    | QUAN-FP     | P Ka | 0,0060              |
| Ho <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,129 g/100g | (0,004)   | QUAN-FP     | HoLa | 0,2102              |
| Ho <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,790 mg/kg  | (0,006)   | QUAN-FP     | HoLa | 0,0678              |
| ZnO                            | 0,045 mg/kg  | (0,001)   | QUAN-FP     | ZnKa | 0,3101              |
| GeO <sub>2</sub>               | 0,036 mg/kg  | (0,001)   | QUAN-FP     | ZnKa | 0,2914              |
| CuO                            | 0,034 mg/kg  | (0,001)   | QUAN-FP     | CuKa | 0,2002              |
| Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,026 mg/kg  | (0,003)   | QUAN-FP     | YbLa | 0,0603              |
| Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,024 mg/kg  | (0,001)   | QUAN-FP     | HgLa | 0,1583              |
| Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,020 mg/kg  | (0,002)   | QUAN-FP     | BiLa | 0,1227              |
| Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,020 mg/kg  | (0,001)   | QUAN-FP     | NiKa | 0,0100              |
| Na <sub>2</sub> O              | No detectado |           |             |      |                     |

En la figura 6 se muestra el espectro de irradiación de la muestra homogénea de la cantera 3.



**Figura 6.** Espectro de irradiación de la muestra homogénea de la cantera 3.

En la figura 7 se presenta comparativamente el silicio obtenido (15 g) mediante el método 1, observado bajo el microscopio.

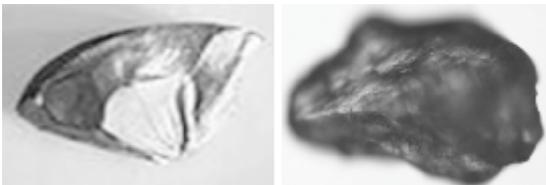


Foto tomada de la bibliografía. Foto de silicio obtenido.

**Figura 7.** Foto comparativa de silicio obtenido por método 1.

En la figura 8 se muestra comparativamente el silicio obtenido (20 g) mediante el método 2, observado bajo el microscopio.

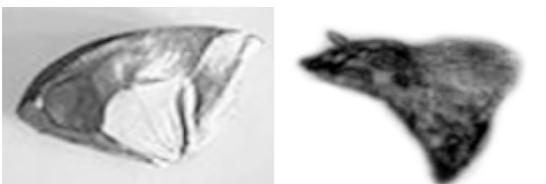


Foto tomada de la bibliografía. Foto de silicio obtenido.

**Figura 8.** Foto comparativa de silicio obtenido por método 2.

## DISCUSIÓN

Las figuras 1, 2, 3, 4 y 5 permiten observar que las canteras de arena se encuentran a lo largo de la carretera Iquitos-Nauta. También se nota en las figuras 4 y 5 el color blanco de la arena, que significa que la naturaleza proporcionó una materia prima de alta pureza, comparativamente a las arenas de otros lugares, donde visualmente se nota que tienen alta contaminación. La ubicación de las canteras de arena (tabla 1) se realizó con un GPS, con un margen de error de 2 m.

Los resultados fisicoquímicos mostrados en las tablas 3, 4, 5 y 6 muestran la densidad de arena medida y oscila entre 1,3 y 1,6 g/cm<sup>3</sup>. El porcentaje de humedad está en el rango de 4,196 y 17,396% para las canteras 3 y 5 respectivamente; las muestras fueron recolectadas en época de lluvia, y el alto valor de la cantera 5 con respecto a las demás, se atribuye a la filtración de agua durante la recolección; por otro lado, en la tabla 5 se aprecia que las impurezas de las muestras de arenas están entre 6,74 y 14,61% para las canteras 2 y 4 respectivamente; probablemente se deba a que esta última se encuentre en explotación; en relación con la composición de las muestras de arena (tabla 6), se aprecia que el rango está entre 94,249 y 99,966% de SiO<sub>2</sub>, siendo la cantera número 3 la que presenta el mayor porcentaje de sílice (SiO<sub>2</sub>), por lo que fue seleccionada como la cantera más apropiada para trabajar en el presente estudio y obtener silicio (Si), elemento básico para la elaboración de las celdas solares. Sin embargo, cabe resaltar que en general todas las arenas estudiadas de las distintas canteras tienen altos porcentajes de SiO<sub>2</sub> y pueden utilizarse en productos con mayor valor agregado en vez de utilizarlo como relleno en las calles, como sucede en la ciudad de Iquitos.

En la tabla 7, referida al análisis fisicome-

cánico, se nota que existe una relación directa entre el porcentaje de arena con el porcentaje de sílice del  $\text{SiO}_2$ , siendo la cantera 3 la que presenta el mayor porcentaje (88,64%); esta y las demás canteras se clasifican como arena franca.

Según los resultados anteriores, se trabajó con las arenas de la cantera 3. La tabla 10 y la figura 6, nos muestran los análisis de difracción de rayos X de energía dispersiva de arena de esta cantera con 96,30% de  $\text{SiO}_2$ , por lo que se considera a este método como el más preciso, que comparando la concentración de la arena de la mezcla homogénea de los tres estratos (30, 60 y 90 cm) de la misma cantera mediante el análisis gravimétrico se obtuvo un 99,07% de  $\text{SiO}_2$  que guarda consistencia con el método de análisis anterior.

Las figuras 7 y 8 muestran los cristales de silicio obtenidos por el método 1-variante y el método 2. Al comparar las fotografías tomadas en el microscopio con las publicadas en las referencias bibliográficas, se aprecia una gran similitud física entre los cristales; sin embargo, es evidente que con un tratamiento más minucioso se puede obtener un silicio de igual o mejor pureza.

## CONCLUSIONES

Todas las canteras estudiadas presentan arenas con elevado porcentaje de  $\text{SiO}_2$ , sin embargo la cantera 3 presenta las propiedades físicas más apropiadas para la obtención de silicio para su explotación en la fabricación de celdas solares fotovoltaicas, pues esta condición disminuye el costo de procesamiento; no debe usarse como relleno, pues sería un desperdicio. Los métodos gravimétricos y espectrométricos son concordantes en los resultados de determinación de la composición de la arena, pero es recomendable para este tipo de estudios métodos más

precisos como el de difracción de rayos X de energía dispersiva. La obtención de silicio mediante el método 1-variante resultó comparativamente ser mejor visualmente, por lo que se considera como el más apropiado.

Finalmente, fue posible obtener silicio de pureza recomendable en las condiciones técnicas de trabajo hasta la fase realizada y sustentado con los resultados obtenidos por los diferentes análisis efectuados de las arenas de San Juan Bautista, que son apropiadas para la obtención de silicio, base fundamental para la fabricación de celdas solares fotovoltaicas. Para llegar a un panel solar es menester quemar más etapas y contar con mayor presupuesto por la tecnología más específica que se requiere.

## AGRADECIMIENTO

Los investigadores agradecen a las autoridades respectivas de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana por haber proporcionado el financiamiento de este proyecto mediante fondos de canon petrolero y a la doctora Izabel Silveira Bueno de la UNICAMP por su apoyo en los análisis de EDXRF.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Antony F, Durschner C, Remmers KH. 2006. Fotovoltaica para profesionales - Diseño, instalación y comercialización de plantas solares fotovoltaicas. Sevilla, España. Progenisa.
- Bernreuter J. 2004. Photon International, pp. 36-42.
- Castro M. 2009. Células solares de silicio para alta concentración: industrialización y células de contacto posterior (tesis doctoral).

- Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) e IALE Tecnología, S. L. 2009. Tendencias tecnológicas mundiales en el desarrollo y aplicación de paneles solares fotovoltaicos. [http://www.energiaysociedad.es/pdf/Informe\\_de\\_VT\\_Energia\\_Solar\\_Fotovoltaica\\_V00\\_ES.doc](http://www.energiaysociedad.es/pdf/Informe_de_VT_Energia_Solar_Fotovoltaica_V00_ES.doc)
- Horn M. 2006a. El estado actual del uso de la energía solar en el Perú. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú. [http://fc.uni.edu.pe/mhorn/Energía % 2 0 s o l a r % 2 0 e n % 2 0 P e r u % 2 0 p e r u e c o n o m i c o . p d f](http://fc.uni.edu.pe/mhorn/Energía%20solar%20en%20Peru%20perueconomico.pdf)
- Horn M. 2006b. El estado actual de las energías renovables no convencionales en el Perú. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú. [horn@uni.edu.pe](mailto:horn@uni.edu.pe)
- Kerrod R. 2004. Ciencia en acción. Vol. 5 Biblioteca Juvenil de la Ciencia Oxford. Editorial Santiago Ltda. Santiago de Chile, p. 46.
- Kriestad K. *et al.*, en Proc. of the 19th European PVSEC, Paris 2004, 568-571.
- Leyden DE. 1987. Spectroscopy.
- Pereda I. 2005. Celdas fotovoltaicas en generación distribuida. Tesis para ingeniero. Santiago de Chile.
- Perú Económico. 2006. Los retos energéticos del Perú. Lima, vol. XXIX, n.º 11, pp. 10-11.
- Pro & Contra. 2009. <http://www.proycontra.com.pe/2009/05/19/evaluan-problema-indigena.pro>
- Rosales MA, Chao C, Cesáreo R, Gigante GE. 1999. Análisis por fluorescencia de rayos X mediante equipos portátiles. UNAM. México.
- Schmela M. 2005. Photon International, pp. 24-35.
- Weidhaus D, Schindlbeck E, Hesse K. 2004. Proc. of the 19 th. In: European PVSEC. Paris, pp. 564-567.
- Whiston C. 1987. X-Ray Methods. John Wiley & Sons, Chichester.

## BIBLIOGRAFÍA

Tomaszewski P. 2005. Polycrystal Silicon for Czochralski crystal growth process.