

ESTUDIO COMPARATIVO DE LA RESPUESTA DE SENSORES  
DE RADIACION OPERANDO EN DIFERENTES ANGULOS

H. Grossi Gallegos, R. Lopardo y G. Atienza

División Energía Solar, Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales

Avenida Mitre 3100, 1663 San Miguel, Buenos Aires

RESUMEN

Dada la necesidad de conocer el comportamiento de los solarímetros de principios fotovoltaico y termoeléctrico en la medición de radiación solar difusa, reflejada y global sobre planos inclinados, este trabajo estudia las respuestas de éstos en condiciones de trabajo reales y en zonas bien diferenciadas. Se interpretan los resultados obtenidos analizando la incidencia de diferentes factores que pueden intervenir.

INTRODUCCION

Teniendo en cuenta que se contempla la ampliación de la Red Solarimétrica a la medición de otros parámetros radiativos además del global, tales como radiación solar difusa, reflejada y en planos inclinados (1), como así también el interés despertado por los resultados obtenidos con el solarímetro fotovoltaico que integra las estaciones, dado su bajo costo y buen comportamiento comparado con otros sensores de principio termoeléctrico (2, 3), se ha continuado con su estudio sistemático.

En diferentes trabajos (4, 5) se ha estudiado el efecto de la inclinación sobre la sensibilidad de solarímetros de principio termoeléctrico. Si bien se han encontrado variaciones de hasta el 11% en la constante de calibración en algunos de estos trabajos, en otro las variaciones fueron del orden del 1%, considerándose en este caso que la sensibilidad no cambiaba. En el caso de las variaciones anotadas se las trató de explicar analizando las celdas de convección generadas en el interior de los solarímetros. En ninguno de los trabajos antes citados se estudiaron solarímetros de tipo fotovoltaico.

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

Durante la campaña llevada a cabo en setiembre de 1979 en la Estación Agrometeorológica del INTA en Abra Pampa (Jujuy) se procedió a calibrar un solarímetro Eppley Modelo 8-48, tipo Black & White, y uno fotovoltaico, operando bajo ángulos de 0°, 30°, 45°, 60° y 90°.

El pirheliómetro usado para las calibraciones fue un Kendall Mark VI, de cavidad absoluta, N° 67605. Las calibraciones fueron llevadas a cabo de la manera usual, es decir, determinando la componente directa de la radiación solar con el Kendall y proyectando su valor sobre la normal al plano del solarímetro, comparando luego este valor con la diferencia de las lecturas tomadas para el solarímetro destapado y tapado; para este último paso se utiliza un disco sombreador de 10cm de diámetro ubicado aproximadamente a un metro del solarímetro, de manera de proteger el elemento sensible de la radiación solar directa (6). De

esta manera, la constante de calibración  $k$  se calcula por la fórmula

$$k = \frac{(D - T)}{cI \cos \theta} \quad (1)$$

D: lectura para el solarímetro destapado (mV)

T: lectura para el solarímetro tapado (mV)

I: lectura del pirheliómetro Kendall ( $\text{mW}/\text{cm}^2$ )

c: coeficiente de conversión de unidades

$\theta$ : ángulo comprendido entre la radiación directa y la normal al plano

Los resultados obtenidos, relativos al valor de las constantes correspondientes al plano horizontal, se muestran en la Figura 1.

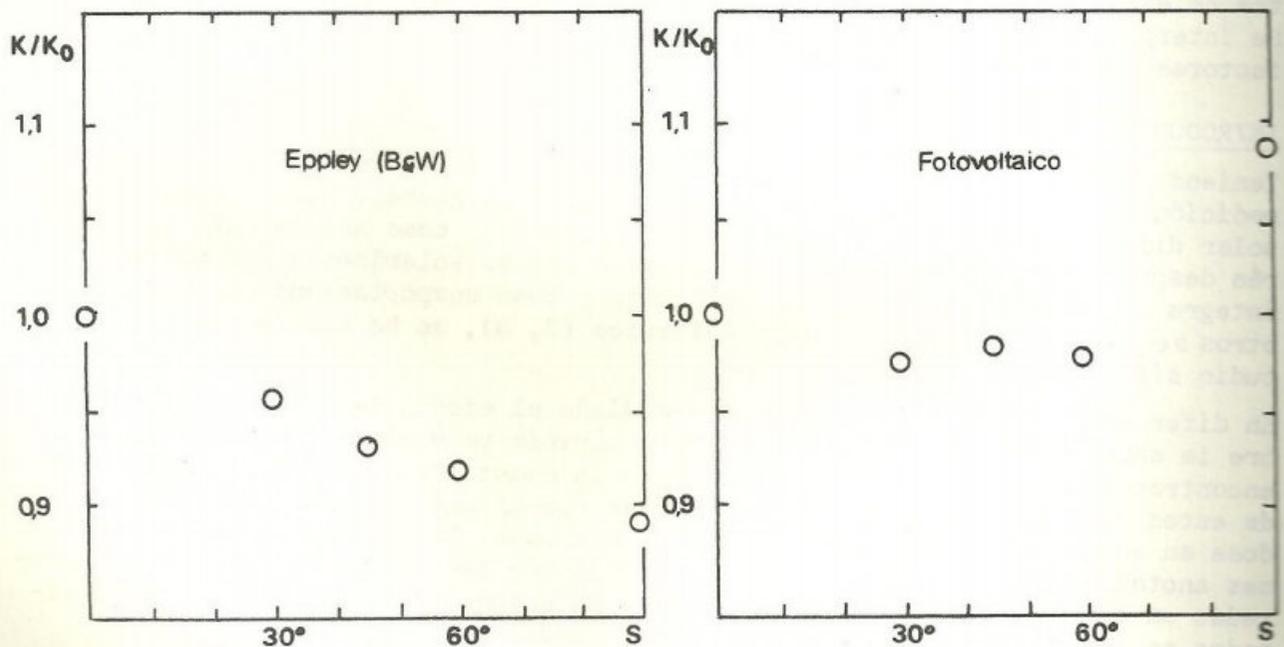


FIGURA 1

#### ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Si bien la franja de variación observada fue del mismo orden en ambos solarímetros, el comportamiento de cada uno resulta muy diferente; además en ambos casos se obtuvieron apartamientos mayores que los esperados. Limitándonos por el momento al fotovoltaico, la variación angular obtenida para la constante podía deberse a dos factores: a) efecto real, vinculado a alguna característica del sensor o de la zona; b) errores de medición.

#### a) Efecto real

Para detectar si el comportamiento observado dependía de la zona se hicieron otras experiencias en el Centro Espacial San Miguel cuyos resultados se pueden

ver en la figura 2.

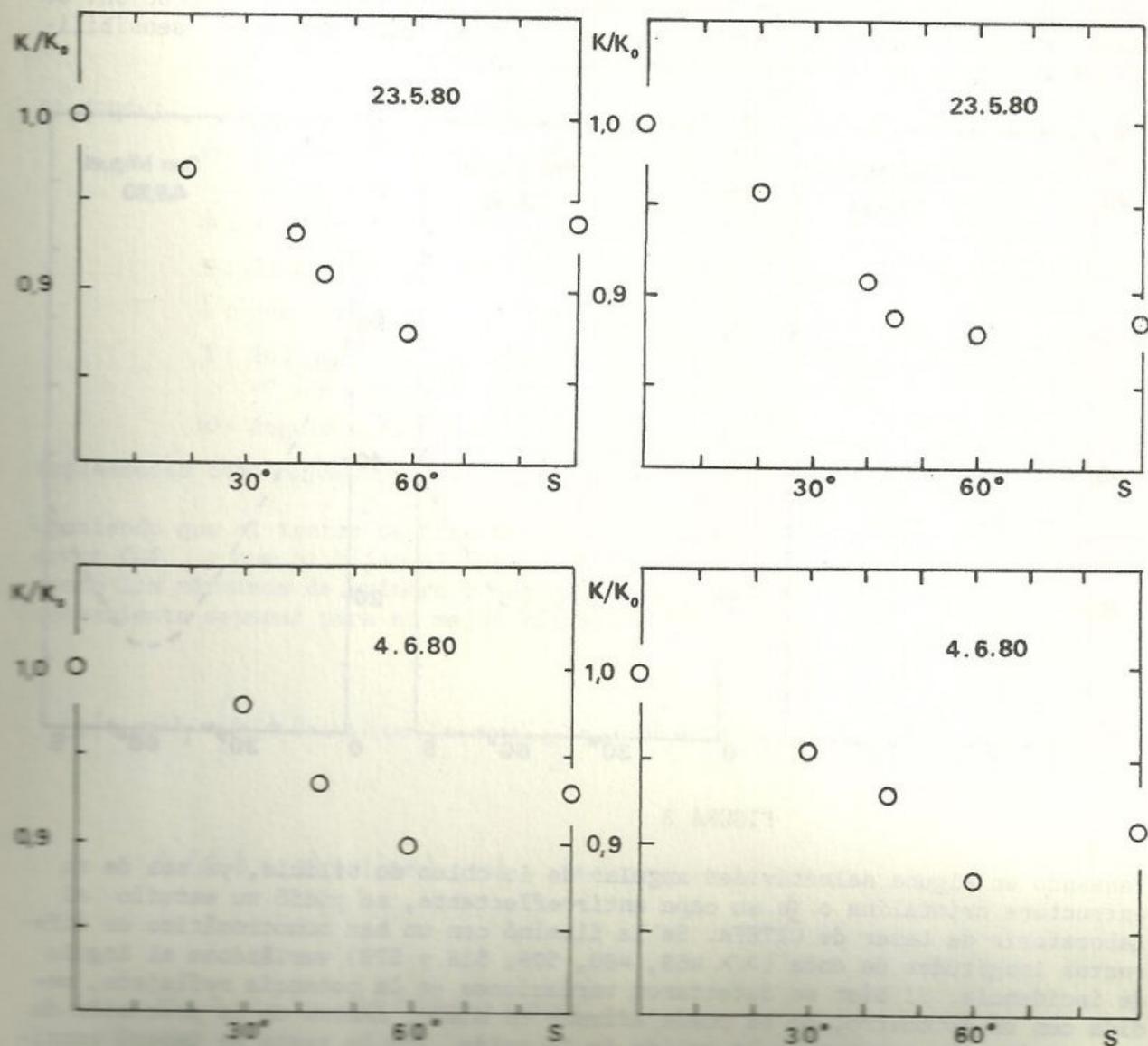


FIGURA 2

En todos los casos se puede observar un comportamiento similar, es decir, el valor de la constante siempre es similar con respecto al valor a cero grado, si bien su disminución es similar con la de los datos de Abra Pampa.

Como primer paso del análisis se descarta el posible efecto de la variación espectral de la respuesta de la celda de silicio (7) pues el método de calibración utilizado anula toda posible contribución de la radiación difusa o reflejada, las que diferirían mucho en Abra Pampa y en San Miguel. Descontando el efecto de la convección dentro del solarímetro, que es despreciable, se pensó en algún efecto superficial. Para ello se calculó la variación del ángulo de inci-

dencia de la radiación solar directa durante los intervalos de calibración. Se puede ver en la figura 3 que en todos los casos el valor mínimo de sensibilidad se encuentra en las cercanías del ángulo mínimo.

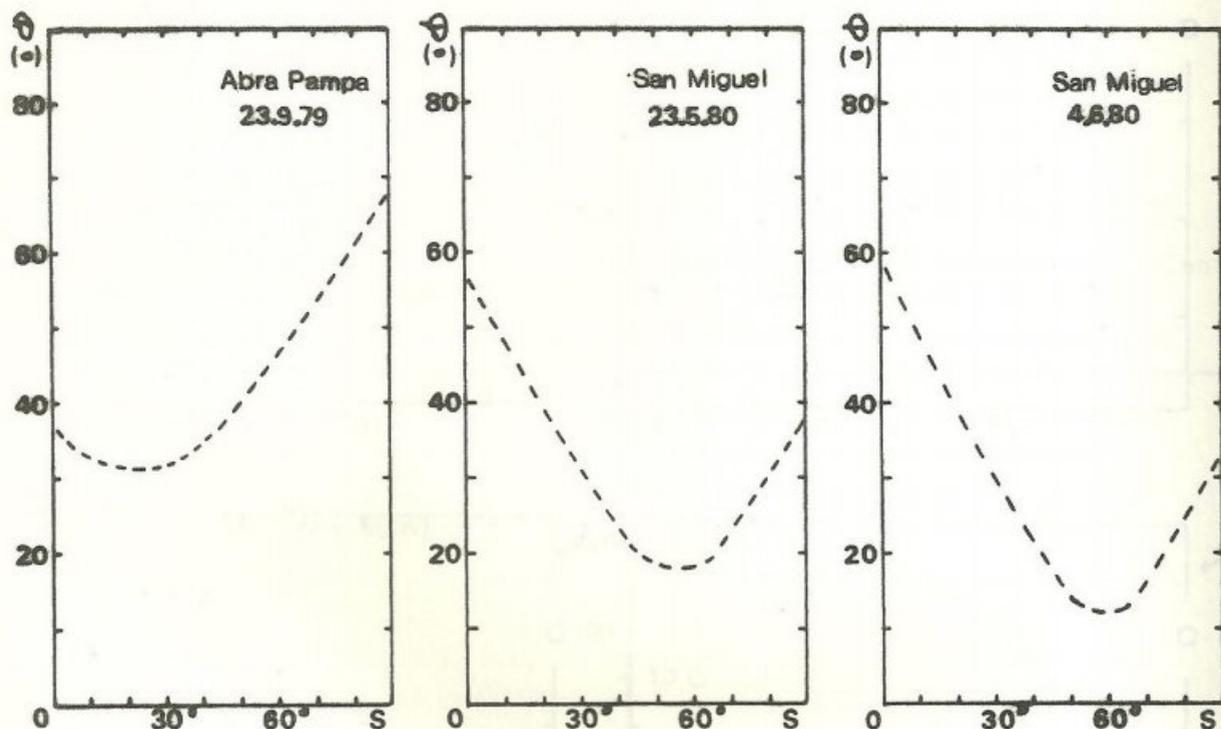


FIGURA 3

Pensando en alguna selectividad angular de la oblea de silicio, ya sea de su estructura cristalina o de su capa antirreflectante, se pidió su estudio al Laboratorio de Laser de CITEFA. Se la iluminó con un haz monocromático de diferentes longitudes de onda ( $\lambda\lambda$  468, 480, 509, 516 y 579) variándose el ángulo de incidencia. Si bien se detectaron variaciones en la potencia reflejada, medida con un fotómetro, no se puede afirmar lo mismo, dentro de la precisión de la medición, con respecto a la salida de la celda. Por lo tanto se deberá continuar con los estudios para explicar este comportamiento.

#### b) Errores de medición

Motivados por la marcada dependencia angular observada en los valores de la constante se decidió evaluar los posibles errores introducidos por una incorrecta orientación del solarímetro.

Dado un plano ubicado sobre la superficie de la tierra, el ángulo comprendido entre la dirección de incidencia de la radiación solar directa y la normal al mismo viene dado por la siguiente expresión (8):

$$\begin{aligned} \cos \theta &= \sin \delta \sin \phi \cos s - \sin \delta \cos \phi \sin s \cos \gamma \\ &+ \cos \delta \cos \phi \cos s \cos \omega + \cos \delta \sin \phi \sin s \cos \gamma \cos \omega \\ &+ \cos \delta \sin s \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \quad (2)$$

en donde:

$\theta$ : ángulo comprendido entre la radiación incidente y la normal al plano;

$\phi$ : latitud del lugar;

$s$ : ángulo comprendido entre la horizontal del lugar y el plano;

$\delta$ : declinación;

$\gamma$ : ángulo comprendido entre la normal al plano y el plano meridiano local, con el cero en la dirección norte;

$\omega$ : ángulo horario;

empleándose como convención de signos la enunciada en un trabajo anterior (9).

Suponiendo que al tratar de orientar hacia el norte el solarímetro se comete un error  $\Delta \gamma$ , y que al fijar el ángulo de la pendiente, un error  $\Delta s$ , y considerando los términos de primero y segundo orden, se llega a una expresión que es conveniente separar para su mejor visualización:

$$\Delta (\cos \theta)_{\gamma} = \left[ A(\phi, \delta, \omega, s) \left( \sin \gamma + \cos \gamma \frac{\Delta \gamma}{2} \right) + B(\delta, \omega, s) \left( \cos \gamma - \sin \gamma \frac{\Delta \gamma}{2} \right) \right] \Delta \gamma \quad (3)$$

$$A(\phi, \delta, \omega, s) = (\sin \delta \cos \phi - \cos \delta \sin \phi \cos \omega) \sin s$$

$$B(\delta, \omega, s) = \cos \delta \sin \omega \sin s$$

$$\Delta (\cos \theta)_{s} = \left[ C(\phi, \delta, \gamma, \omega) \left( \cos s - \sin s \frac{\Delta s}{2} \right) - D(\phi, \delta, \omega) \left( \sin s + \cos s \frac{\Delta s}{2} \right) \right] \Delta s \quad (4)$$

$$C(\phi, \delta, \gamma, \omega) = \cos \delta (\sin \phi \cos \gamma \cos \omega + \sin \gamma \sin \omega) - \sin \delta \cos \phi \cos \gamma$$

$$D(\phi, \delta, \omega) = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega$$

Las fórmulas 3 y 4 indican la contribución al error total introducida por error en azimut ( $\Delta\gamma$ ) y en la pendiente ( $\Delta s$ ), respectivamente.

Calculando los valores de estas funciones en  $\gamma = 0$  para diferentes errores de azimut y pendiente y diferentes ángulos horarios ( $30^\circ$ ,  $15^\circ$  y  $0^\circ$ ), y dividiendo por la fórmula 2 se obtuvieron las variaciones del error relativo para Abra Pampa, las que se ven en las figuras 5 y 6.

Estimando los posibles errores de orientación cometidos en esa oportunidad, los resultados obtenidos se pueden ver en la figura 4.

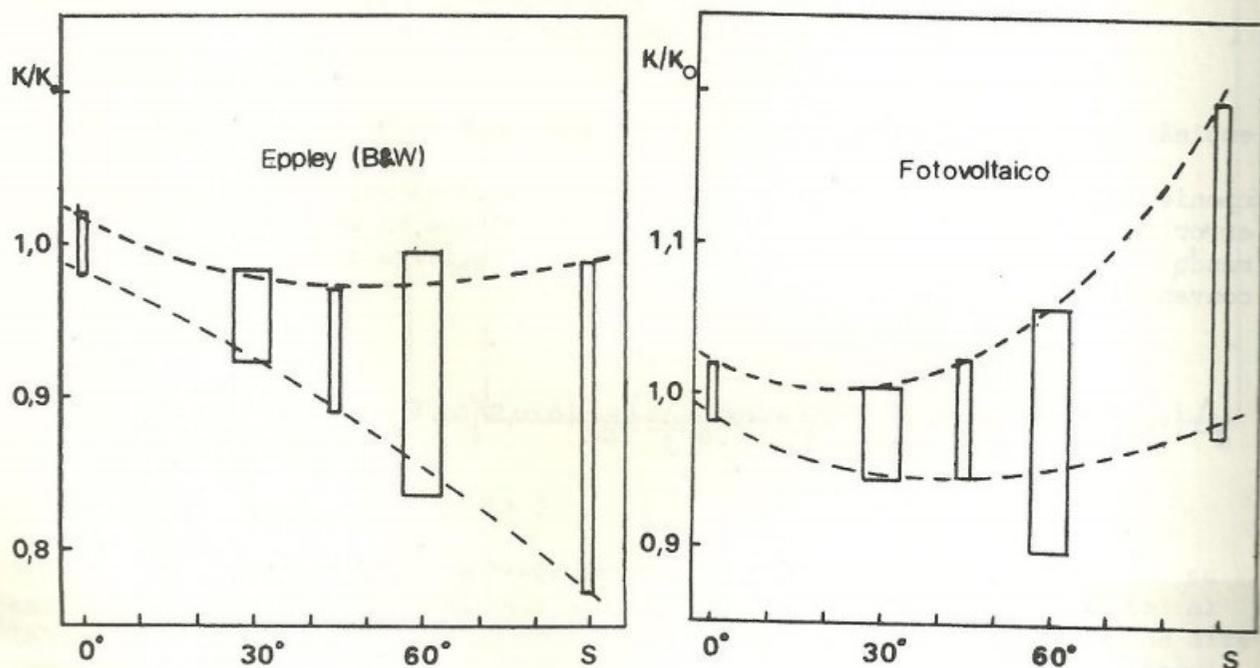
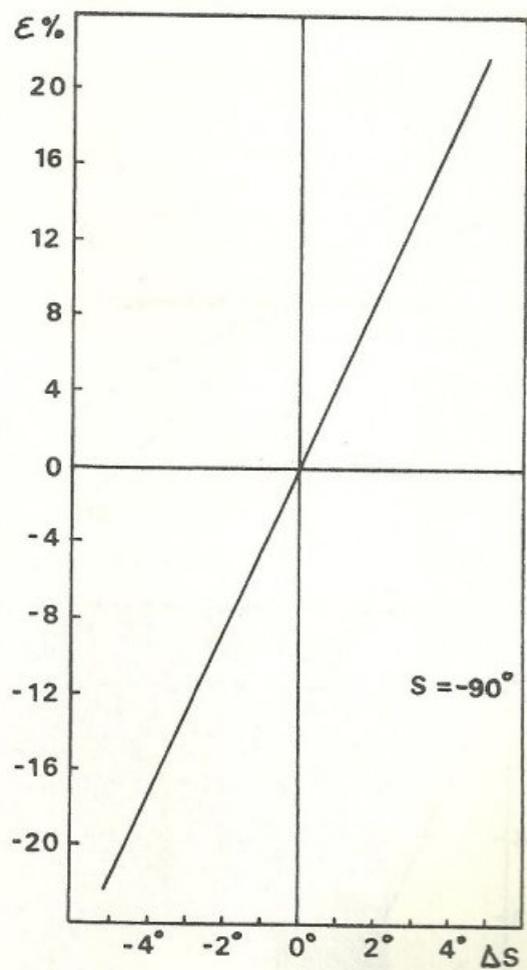
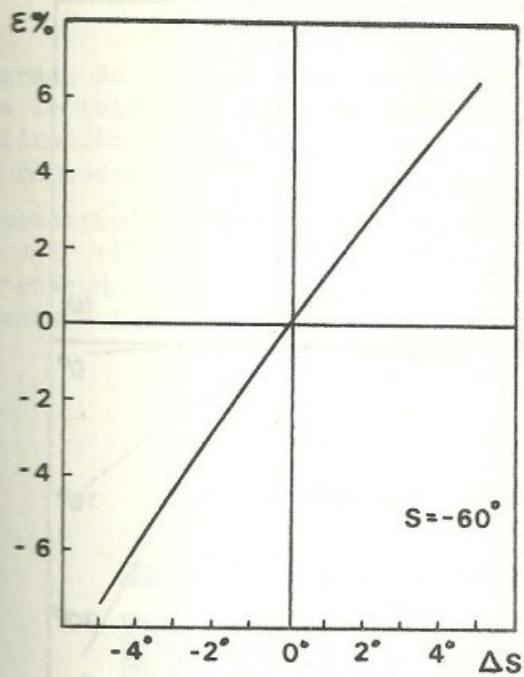


FIGURA 4



$\phi = -22,83^\circ$   
 $\delta = -1,01^\circ$   
 $\gamma = 0^\circ$   
 $0^\circ \leq \omega \leq 30^\circ$

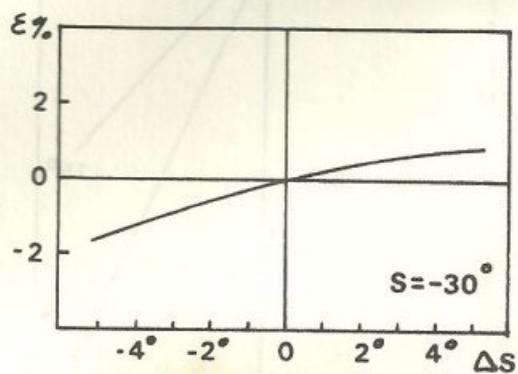
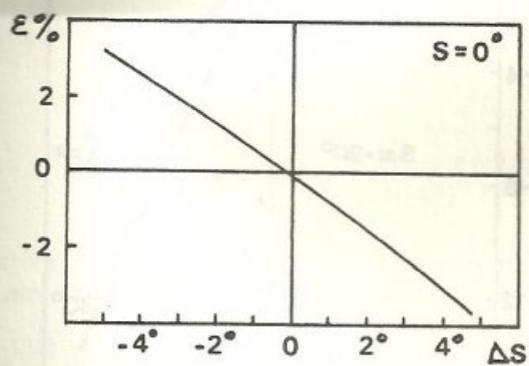
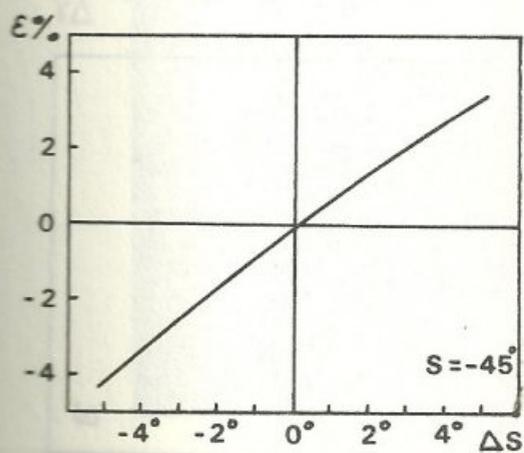


FIGURA 5

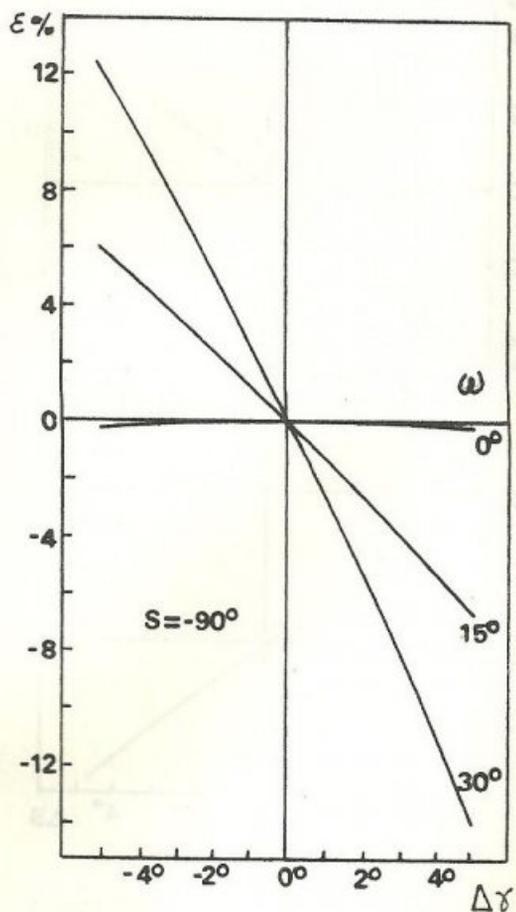
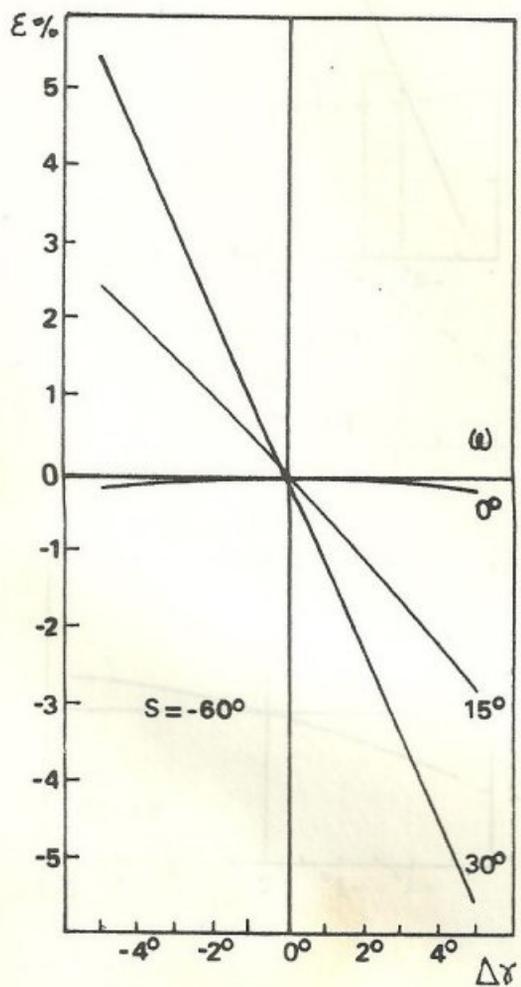
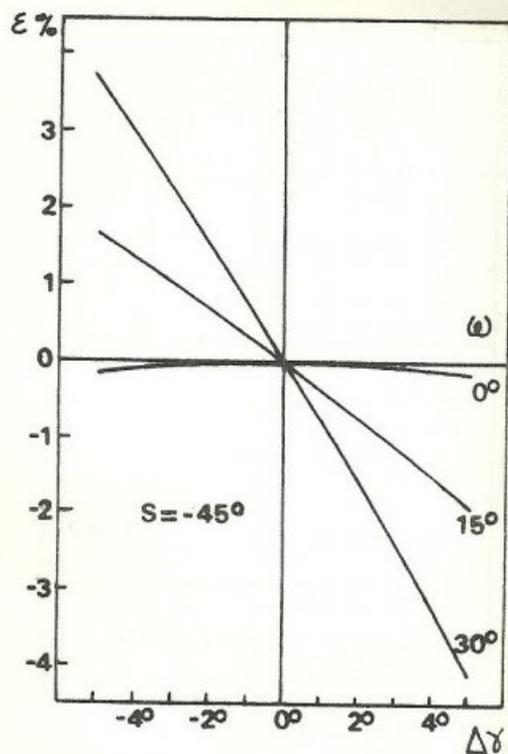
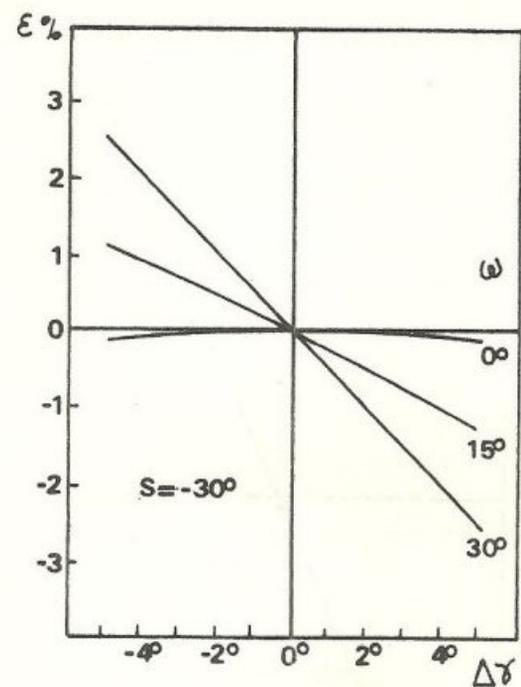


FIGURA 6

El grado de incerteza es tal que exime de todo comentario, si bien no se desdibuja la tendencia antes anotada de la existencia de un mínimo. Esto motivó la realización de nuevas experiencias en San Miguel para las que se tomaron todos los recaudos posibles para minimizar los errores.

Se construyó una base que permite asegurar las pendientes con errores entre  $0,5$  y  $1^\circ$  (Figura 7) y se la orientó hacia el norte utilizando una brújula, pero teniendo en cuenta la declinación magnética en el lugar, que en esa época alcanzaba a los  $-3^\circ 03'$ .

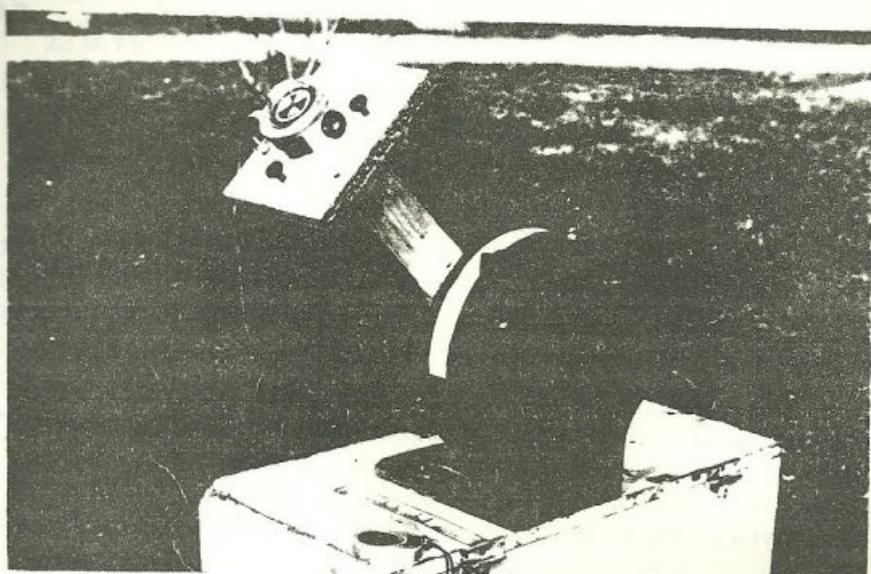


FIGURA 7

Los valores obtenidos en estas condiciones para un solarímetro Black & White y uno fotovoltaico pueden observarse en la figura 8.

Se puede apreciar ahora que ha disminuído el rango de variación de la sensibilidad de ambos sensores, siendo comparable la del fotovoltaico con la del termoelectrónico, lo cual constituye un resultado altamente alentador.

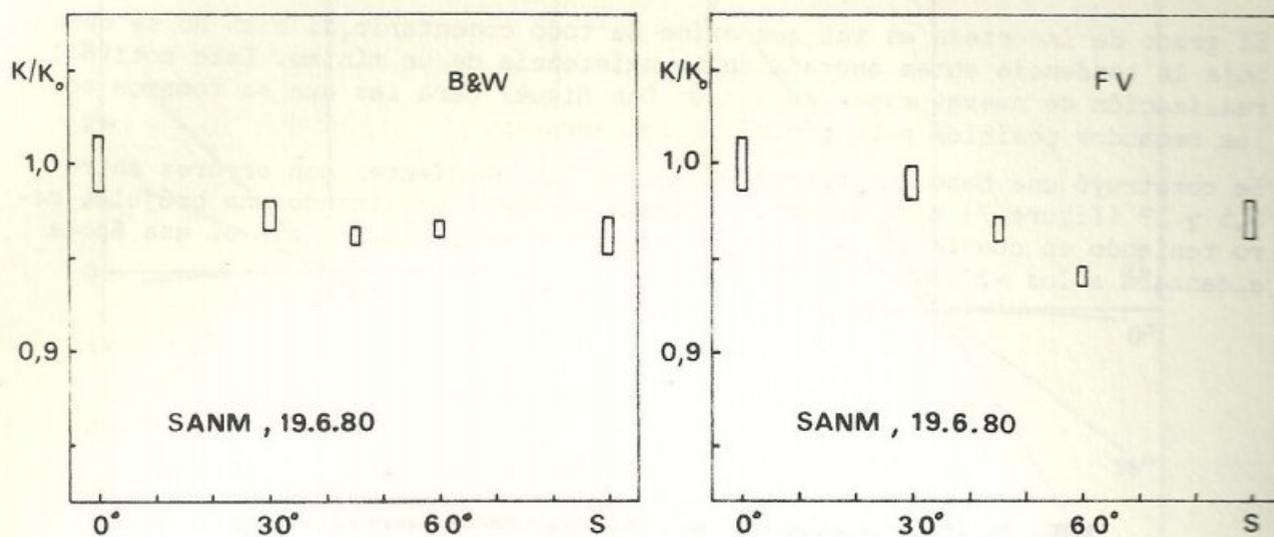


FIGURA 8

#### COMENTARIOS SOBRE EL ERROR DE ORIENTACION

Antes de seguir adelante con el análisis del comportamiento del detector fotovoltaico conviene hacer hincapié en que el problema de la orientación no es sólo grave para los grupos que calibran instrumental sino también para los usuarios de cualquier equipo de medición de radiación instantánea.

Aún suponiendo que la variación de la constante de calibración con el ángulo fuera despreciable, un error de orientación provoca que la lectura del solarrímetro indique una radiación que no corresponde a la recibida por el plano en cuestión, ya que el valor de la radiación directa, que aporta aproximadamente un 90% del total, depende del ángulo  $\theta$  a través de la fórmula

$$I_{\text{med}}(\theta) = k I \cos \theta \quad (5)$$

La propagación del error en la fórmula 5 lleva a considerar dos términos, además de la aproximación de lectura:

$$\varepsilon(I_{\text{med}}) = \varepsilon(k) + \varepsilon(\cos \theta) \quad (6)$$

El primero contempla el error cometido durante la calibración (número de dígitos, dispersión del promedio, orientación) y el segundo es el mismo al que se hizo mención anteriormente, el que puede llegar a valores que invaliden toda conclusión. Para citar algún ejemplo, un error de 3° en plano vertical, en una medición tomada dos horas antes del mediodía en el solsticio de verano, puede introducir un error del 34%, que se reduciría al 26% si se midiera al mediodía. Reduciendo el error en la pendiente a 1° se puede llevar la discrepancia al 10%. Estos valores corresponden a una latitud de 35°S.

COMPORTAMIENTO DEL SOLARIMETRO FOTOVOLTAICO PARA LA MEDICION DE RADIACION SOLAR DIFUSA Y REFLEJADA EN DISTINTOS ANGULOS.

Para dilucidar el comportamiento de un detector fotovoltaico en la medición de radiación difusa y reflejada se están estudiando una serie de experiencias a realizar.

Por el momento, y a partir de los datos obtenidos durante las calibraciones, se han representado en la figura 9 los valores de difusa medidos por un detector fotovoltaico y uno termoelectrico, como así también la relación de difusa a global para ambos solarímetros, correspondientes a experiencias llevadas a cabo en Abra Pampa con cielo totalmente despejado, sin obstáculos cercanos y vegetación baja de zona árida, y en San Miguel, con cielo despejado, suelo cubierto de césped y construcciones cercanas.

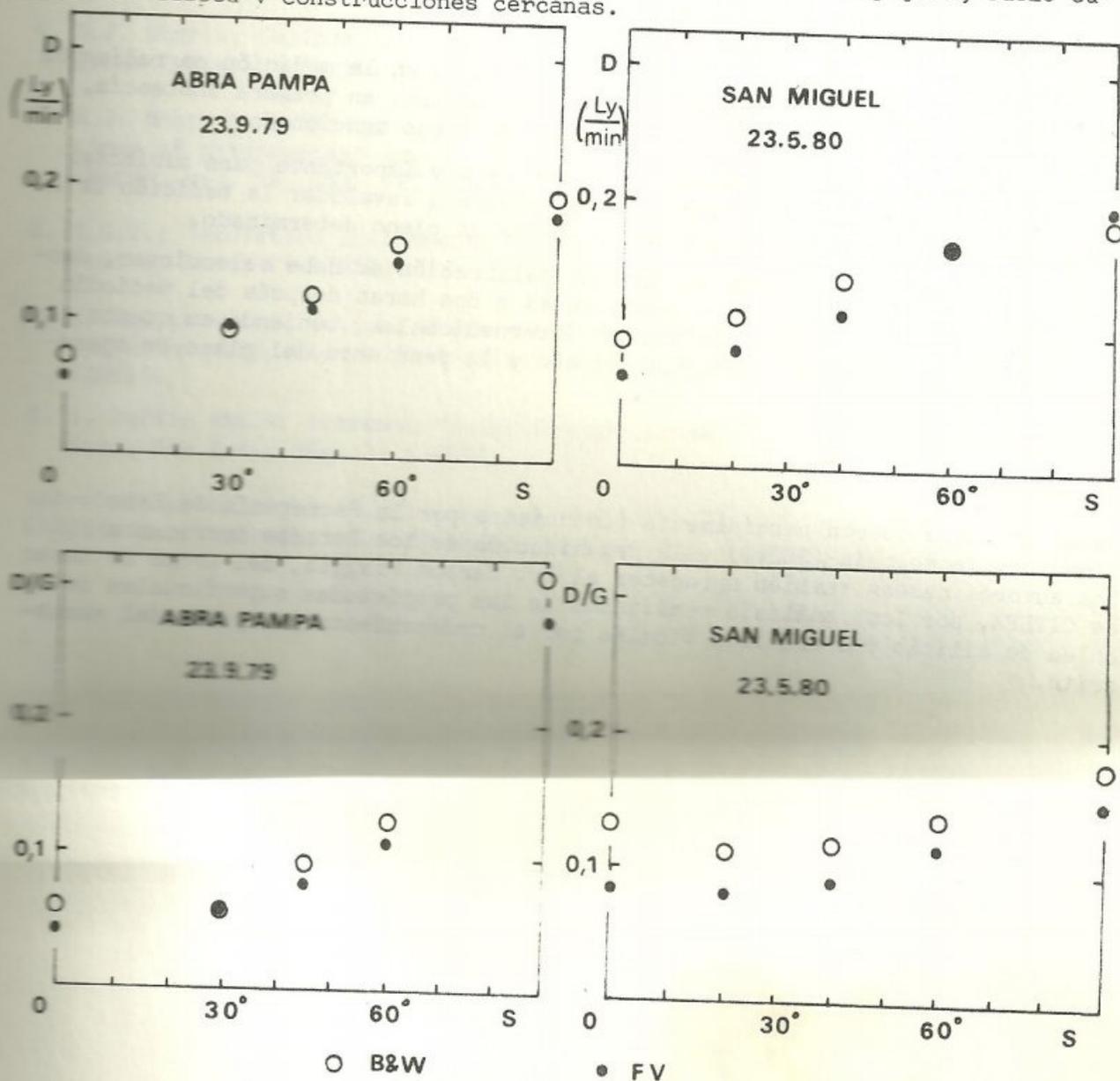


FIGURA 9

De la observación de los gráficos se puede extraer, como conclusión preliminar, que el comportamiento de ambos sensores es similar.

### CONCLUSIONES

Los resultados finales obtenidos en este trabajo se pueden resumir en los siguientes puntos:

- La sensibilidad del solarímetro fotovoltaico varía con la inclinación del plano de operación.
- La variación observada es del orden de la registrada en el solarímetro de principio termoeléctrico Eppley tipo Black & White.
- La dependencia angular de la citada variación se debe a propiedades del cristal o de la capa antirreflectante y no de las características de la región geográfica en la que opera.
- El comportamiento del detector fotovoltaico en la medición de radiación difusa y reflejada bajo diferentes ángulos es, en primera instancia, comparable con el sensor termoeléctrico antes mencionado.
- La correcta orientación del detector es muy importante para minimizar errores que, de otra forma, pueden llegar a invalidar la medición de la radiación instantánea que incide sobre un plano determinado.
- El momento para llevar a cabo una calibración se debe seleccionar, dentro del intervalo de dos horas antes o dos horas después del mediodía solar aconsejado por las normas internacionales, teniendo en cuenta la latitud del lugar, la época del año y la pendiente del plano de operación.

### AGRADECIMIENTOS

Estos estudios fueron parcialmente financiados por la Secretaría de Estado de Ciencia y Tecnología (SECyT) y la Organización de los Estados Americanos (OEA). Los autores desean también agradecer al Dr. Carlos Piaggio, del Grupo de Laser de CITEFA, por los análisis realizados de las propiedades superficiales de la oblea de silicio y a Graciela Vidales por el ordenamiento y tipeado del manuscrito.

## REFERENCIAS

1. J. Cardoso, H. Grossi Gallegos, R. Lopardo, M. García, G. Atienza y G. Vidales; Red Solarimétrica: Informe de Avance, presentado en la 6ta. Reunión de Trabajo de ASADES, Catamarca (1980).
2. R. Lopardo, M. García y G. Atienza; Aspectos Técnicos de la Red Solarimétrica, Actas de la 4ta. Reunión de Trabajo de ASADES, La Plata, pág. 365, (1978)
3. R. Lopardo, M. García y G. Atienza; Comportamiento de un detector fotovoltaico en diferentes condiciones, Actas de la 5ta. Reunión de Trabajo de ASADES Córdoba, pág. 5 (1979).
4. D.J. Norris; Calibration of pyranometers in inclined and inverted positions, Solar Energy, vol. 16, pág. 53 (1974).
5. A.J. Mohr, D. Dahlberg and I. Dirmhirn; Experiences with tests and calibrations of pyranometers for a mesoscale solar - irradiance network, Solar Energy, vol. 22, pág. 197 (1979).
6. I.G.Y.; "Radiation Instruments and Measurements", Pergamon Press, Londres, vol. 5, Part. VI (1958).
7. K. Selçuk and J. Yellot; Measurements of direct, diffuse and total solar radiation with silicon photovoltaic cells, Solar Energy, vol. 6 pág. 155 (1962).
8. J. Duffie and W. Beckman; "Solar Energy Thermal Processes", John Wiley & Sons, New York, pág. 15 (1974).
9. H. Grossi Gallegos, G. Atienza y R. Lopardo; Cálculo del tiempo de insola-ción para superficies inclinadas, publicación interna de la CNIE (1979)