

IRRADIANZA SOLAR Y TEMPERATURA DEL AIRE SUPERFICIAL EN UNA ATMÓSFERA ESTÁTICA

René Torrez S.

*Instituto de Investigaciones Físicas
Carrera de Física
Universidad Mayor de San Andrés*

RESUMEN

De la observación de varios registros meteorológicos de nuestras estaciones, se ha determinado un típico corrimiento de los máximos de temperatura diarios con respecto al máximo de la radiación solar diaria. Estos oscilan entre 3 y 5 horas, es decir, que mientras el máximo de radiación solar se presenta alrededor del medio día, el máximo de la temperatura ambiental superficial se sitúa alrededor de las cuatro de la tarde. Paralelamente el movimiento del aire inducido por el gradiente térmico en la superficie da lugar a un viento cuya máxima intensidad se sitúa en correspondencia con el máximo de la temperatura superficial. De esta manera, en condiciones de una atmósfera estática, los tres parámetros meteorológicos más importantes como la radiación solar, la temperatura y la velocidad del viento se correlacionan estrechamente. En el presente artículo se muestra la relación entre estos parámetros meteorológicos de acuerdo a principios básicos de la física térmica y de fluidos.

Descriptor: física de la atmósfera — dinámica de fluidos — registro y procesamiento de datos

ABSTRACT

Using data obtained from several meteorological stations we constructed a typical shift of the daily maxima of temperature in relation to the maximum daily solar radiation, which ranges between 3 and 5 hours, i.e., while the solar radiation maximum appears (around noon), the maximum of the superficial environmental temperature takes place around four o'clock in the afternoon. Simultaneously, the movement of the air induced by the thermal gradient on the surface leads to a wind with an intensity maximum that coincides with the maximum of the superficial temperature. Thus in static environment conditions solar radiation, temperature and wind speed are closely correlated. In the present article, the relationship between these meteorological parameters appears to be in accordance with the basic principles of thermal and fluids physics.

Key words: atmosphere physics — fluid dynamics — observation and data reduction techniques

1. INTRODUCCIÓN

El Laboratorio de Física de la Atmósfera (LFA) y el Instituto de Meteorología de Munich han emprendido el proyecto Juipit'aya con el objetivo de estudiar la interacción atmosférica entre el valle y el altiplano de nuestra región. De esa manera se han instalado una serie de estaciones meteorológicas en las proximidades a la ciudad de La Paz.

Para el presente trabajo se han seleccionado una serie de registros de la estación de Milluk'atu en el valle del río de La Paz, y de la estación de Cota Cota (edificio principal del LFA) con la característica de presentar días particularmente estables, estos corresponden en su mayoría a los meses entre mayo y septiembre donde los días son mayormente soleados y tranquilos.

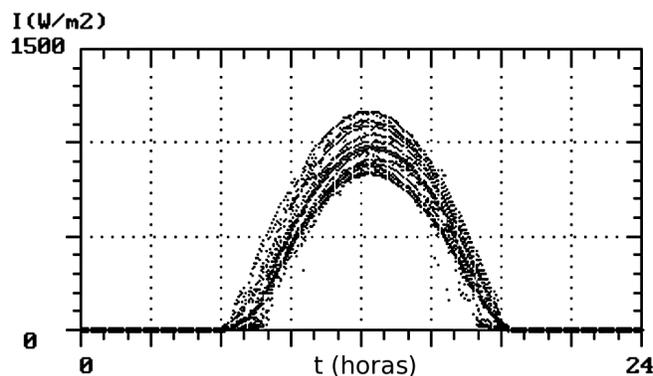


Figura 1. Registro de la radiación solar de todos los días claros y casi quietos entre julio de 2003 y junio de 2004 en Milluk'atu.

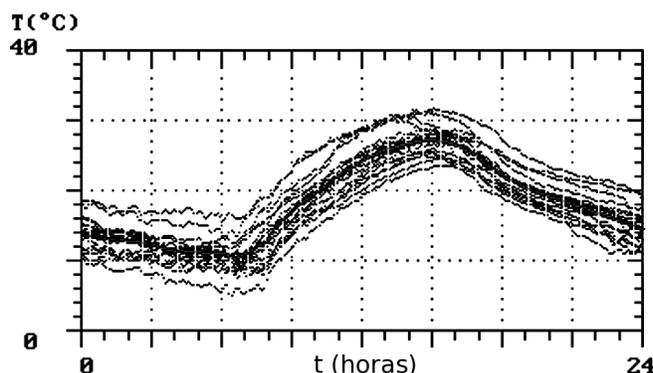


Figura 2. Registro de las temperaturas en Milluk'atu. Correspondientes sólo a los días claros.

2. DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS

Inicialmente se presentan los registros de la estación meteorológica de Milluk'atu seleccionados con las condiciones más estables en el tiempo, observados a partir de sus registros de radiación solar, todos ellos superpuestos sobre una misma gráfica con la finalidad de observar claramente las características típicas de los parámetros meteorológicos de interés.

La gráfica de la figura 1 presenta los registros de radiación solar entre los meses de julio del año 2003 hasta junio de 2004. Se puede observar en el mismo los típicos perfiles de la radiación solar en condiciones de cielo claro, afectados naturalmente por el desplazamiento del sol a lo largo del año con respecto a la tierra, o a la inversa.

Es notorio observar en la gráfica el efecto de las montañas y cerros que envuelven el curso del río de La Paz durante las primeras horas de la mañana y al final de la tarde. En la gráfica, las sombras se manifiestan como deformaciones a la tendencia de la curva, particularmente en el momento de la salida y entrada del sol por el horizonte.

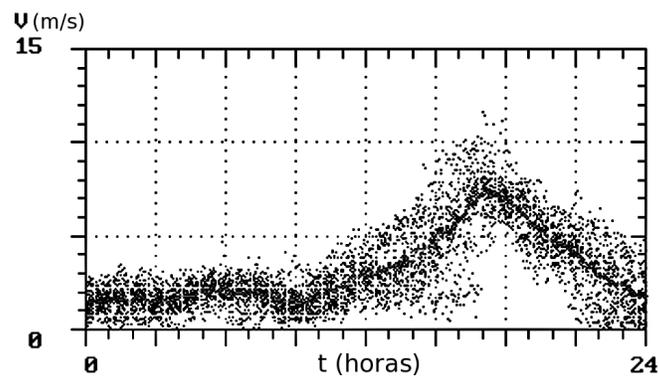


Figura 3. Registro de la velocidad del viento en Milluk'atu. Sólo días claros.

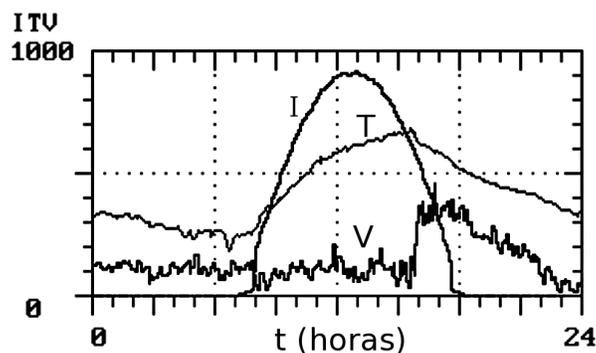


Figura 4. Registro de la radiación solar, la temperatura, y el viento correspondiente al día 5 de agosto de 2003 en la localidad de Milluk'atu (escalas arbitrarias).

Por la nitidez que determinan las diferentes curvas solapas, así como por la intensidad del máximo de la radiación solar se puede determinar que estas corresponden a los meses de invierno, mientras que las de mayor intensidad y menor frecuencia de registros corresponden a los meses de verano.

Observando los registros de la temperatura correspondiente para los días seleccionados (Fig. 2), se puede establecer que inmediatamente que aparece el sol la temperatura asciende rápidamente, disminuyendo luego su velocidad de ascenso, hasta alcanzar sus valores máximos siempre después del medio día. El valor medio de este corrimiento para toda la temporada se sitúa aproximadamente entre las tres y cuatro de la tarde.

Luego de que el aire ha alcanzado su máxima temperatura éste desciende con mayor rapidez comparada con la velocidad de ascenso a igual temperatura.

A medida que el tiempo transcurre el descenso se hace cada vez más lento hasta las primeras horas de la madrugada, momento alrededor del cual se sitúan los valores mínimos diarios de temperatura. En los días claros éstos coinciden con el momento

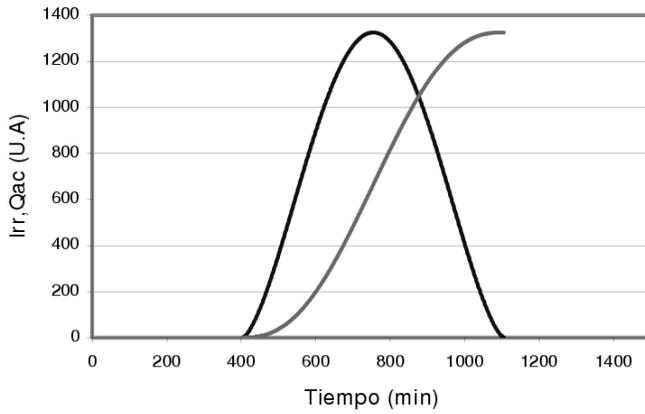


Figura 5. Energía solar incidente (línea negra) y calor acumulado en el suelo (línea gris) en escalas diferentes.

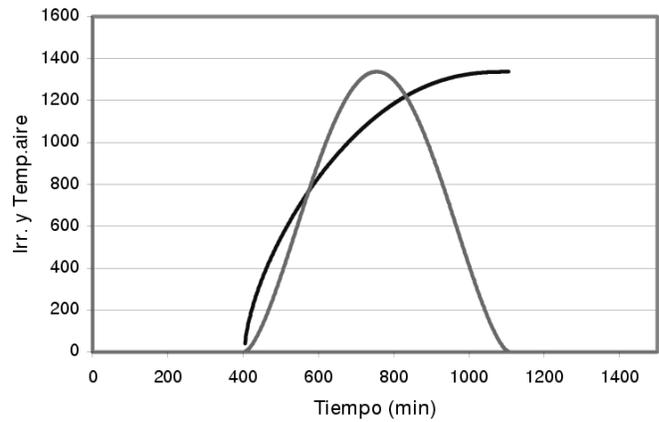


Figura 7. Irradianza solar teórica (línea gris) y temperatura del aire (línea negra) en escalas arbitrarias.

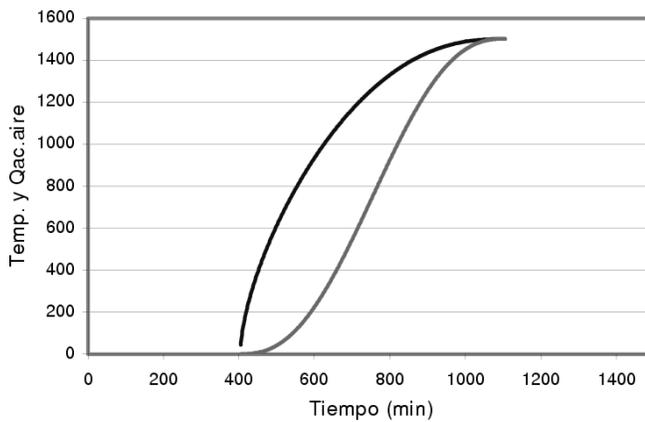


Figura 6. Temperatura del suelo (línea negra) y calor acumulado en el aire (línea gris) en escalas diferentes.

de incidencia de los primeros rayos solares.

Observando los registros de la velocidad de los vientos en la figura 3, se establece que éstos se inician a media mañana, aumentando su intensidad hasta alcanzar valores máximos al final de la tarde. A partir de este punto, decrecen hasta la media noche, pasada la cual, su velocidad se torna prácticamente constante hasta la media mañana del día siguiente.

La figura 4 muestra un día particular del conjunto de datos solapados de las figuras anteriores. Este día es el más próximo a lo que se llamaría un día calmado, con la atmósfera casi en reposo. La gráfica presenta escalas apropiadas para cada variable sólo con la finalidad de mostrar la forma de la variación de las funciones. Así, se puede observar en ésta la curva casi ideal de la radiación solar; la temperatura que asciende casi regularmente hasta cierto valor máximo, a partir del cual decrece rápida y paulatinamente hasta el día siguiente; y la baja velocidad del viento hasta el final de la tarde mues-

tra la condición de atmósfera en reposo, sin embargo, poco antes de la puesta del sol se observa una desestabilización que dura hasta la media noche.

Es importante observar la correspondencia temporal que existe entre el momento en que se inicia el viento y el momento en que se alcanza la máxima temperatura del aire.

3. SIMULACIÓN DEL PROCESO

Se ha modelado una curva de irradianza solar teórica para un día completamente claro. Con sus valores de irradiación minuto a minuto se ha procedido a evaluar el calor acumulado en el suelo como una fracción de la energía total incidente. La figura 5 muestra una gráfica del calor acumulado en el suelo a medida que transcurre el día.

Si llamamos $I_s(t)$ a la irradianza solar, $I_a(t)$ a la irradianza del aire, e $I_g(t)$ a la irradianza del suelo al instante t , entonces el calor acumulado en el suelo hasta ese momento será:

$$Q_{acs} = a \int_0^t I_s(t)dt + b \int_0^t I_a(t)dt. \quad (1)$$

De igual manera, el calor acumulado en el aire será:

$$Q_{acs} = c \int_0^t I_s(t)dt + d \int_0^t I_g(t)dt. \quad (2)$$

Mientras el suelo se calienta, también irradia energía calentando el aire superficial. Este calor se va acumulando en el aire al mismo tiempo que va reirradiando calor al suelo. La figura 6 muestra la temperatura del suelo y el calor acumulado en el aire.

Para la evaluación de este proceso se han considerado los flujos de energía del suelo al aire y a la

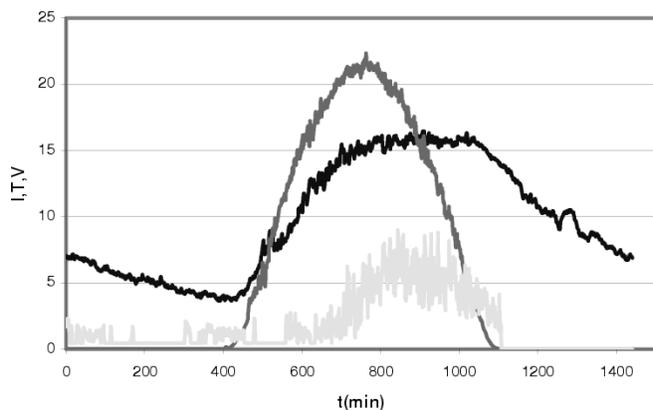


Figura 8. Curvas de la radiación solar (línea gris), la temperatura (línea negra) y la velocidad del viento (línea gris claro) en Cota Cota.

inversa en un proceso iterativo. La irradiación constante determina un almacenamiento progresivo de calor en el terreno, simultáneamente el suelo caliente reemite radiación, calentando de esta manera el aire que se encuentra sobre el mismo. Este aire caliente reemite también, de modo que parte de su energía es absorbida nuevamente por el terreno, y así sucesivamente hasta que se logra una situación de equilibrio momentáneo. Esto permite obtener los calores acumulados en el suelo y en el aire a lo largo del día, y de allí por la ley de Stephan-Boltzmann obtenemos la temperatura asociada a ellos. De esta manera, si Q_{aca} es el calor acumulado en el aire, entonces la temperatura del aire será:

$$T_a = cQ_{aca}^{1/4}. \quad (3)$$

La figura 7 muestra la curva de irradianza solar teórica y la temperatura del aire esperada en condiciones de atmósfera completamente estática. En esta figura se puede observar que la máxima temperatura se logra alcanzar justo al poniente del sol. Sin embargo, en la práctica, la temperatura máxima del aire se alcanza a mitad de la tarde, lo cual se explica por las corrientes de convección de aire que se llevan el calor provocando una disminución en el aporte de calor al aire, y hasta una pérdida de calor en el mismo. La figura 4 confirma este hecho: en la misma se observa que la temperatura va alcanzando el máximo hacia el final de la tarde, cuando se presenta la desestabilización del aire, que ocasiona la rápida disminución de temperatura del mismo.

El análisis de los flujos de radiación, a partir de las relaciones de transferencia radiativa planteados sobre una hoja electrónica, hacen posible determinar las soluciones para el calor acumulado tanto en

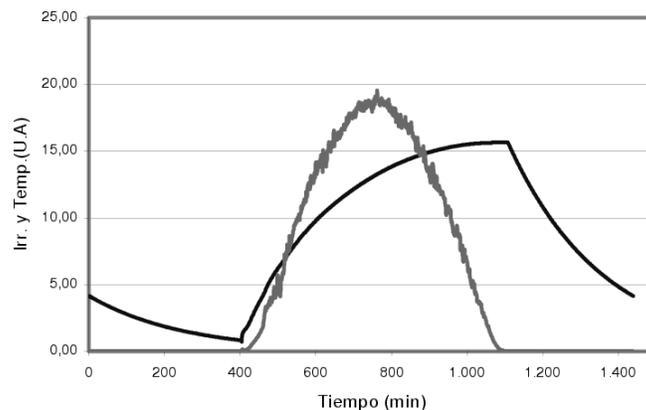


Figura 9. Curva real de radiación solar (línea gris) y curva de temperatura simulada (línea negra).

el suelo como en el aire inmediatamente sobre él. El método empleado hace uso de las ecuaciones básicas aplicadas a celdas en el suelo y en el aire en un proceso iterativo que da como resultado los calores almacenados en ambos medios; naturalmente se han empleado una serie de coeficientes que afectan a los flujos, incorporando de esa manera los coeficientes de absorción y emisión de dichos medios.

Las gráficas obtenidas para el calor acumulado en el terreno a partir de una irradianza solar casi ideal dan cuenta que los valores máximos se alcanzan hacia el final de la tarde, es decir, al momento de la puesta del sol. A partir de ese momento, la superficie se enfría paulatinamente hasta la alborada del día siguiente. Las curvas típicas de este comportamiento tienen la forma de exponenciales crecientes y decrecientes, tal como se puede observar en la figura 9.

En la situación real, la masa de aire caliente sobre el terreno empieza a moverse por efecto hidrostático, produciendo una corriente de aire que va incrementándose en intensidad hasta constituirse en un flujo importante que da lugar a una evacuación del calor en el aire, resultando en consecuencia en una disminución de la tasa de calor acumulado, hasta tornarse inclusive en una pérdida total de calor, en cuyo caso, la temperatura del aire decrece rápidamente hacia el final de la tarde.

Cuando cesa el flujo de aire, el decrecimiento disminuye paulatinamente hasta el día siguiente, siguiendo aproximadamente la ley de enfriamiento de Newton.

Observando las gráficas de la figuras 4 y 8 se puede observar la similitud de comportamiento, verificándose las explicaciones realizadas.

4. CONCLUSIONES

Fue posible explicar a partir de los principios básicos de la física el desarrollo primario de los fenómenos vinculados al estado del tiempo, en este caso de la energía solar, la temperatura y el viento en una atmósfera estática. Naturalmente, en condiciones reales ni el calentamiento de la superficie es regular, ni las masas de aire permanecen quietas sobre el terreno. Un día típico se caracteriza por periodos de sombra y sol debido a las nubes, esto provoca súbitos enfriamientos de las masas de aire, variaciones en la humedad del aire, cambios de presión en la atmósfera, corrientes de aire, precipitaciones, etc.. Todos estos fenómenos se pueden considerar casi independientes unos de otros debido a que los mismos mezclan los fenómenos básicos haciendo que las relaciones entre ellos se tornen muy complejas.

Si bien el método descrito en este trabajo es aplicable a la atmósfera en condiciones más complejas,

queda limitado por la dimensión y el número de celdas de cálculo de las hojas electrónicas.

5. AGRADECIMIENTOS

Es un deber agradecer a todo el personal del Instituto de Investigaciones Físicas y de la Carrera de Física de la UMSA por la cooperación en la instalación y recolección de datos. Merecen especial agradecimiento los colegas del grupo de meteorología del Laboratorio de Física de la Atmósfera y los diferentes ayudantes de investigación asignados al grupo de trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Houghton J., *The Physics of Atmospheres*, Cambridge University Press, 2002.
- [2] Goody R. M., Yung Y. L., *Atmospheric Radiation (Theoretical Basis)*, Oxford University Press, 1989.
- [3] Iqbal M., *An Introduction to Solar Radiation*, Academic Press, 1983.