

CAPITULO 1

LA RADIACION

SOLAR

ESPECTRO LUMINOSO

La luz, sea ésta de origen solar, o generada por un foco incandescente o fluorescente, está formada por un conjunto de radiaciones electromagnéticas de muy alta frecuencia, que están agrupadas dentro de un cierto rango, llamado *espectro luminoso*. Las ondas de baja frecuencia del espectro solar (infrarojo) proporcionan calor, las de alta frecuencia (ultravioleta) hacen posible el proceso de fotosíntesis o el bronceado de la piel. Entre esos dos extremos están las frecuencias que forman la parte visible de la luz solar. La intensidad de la radiación luminosa varía con la frecuencia. La Fig 1.1 muestra, en forma no detallada, la composición del espectro luminoso.

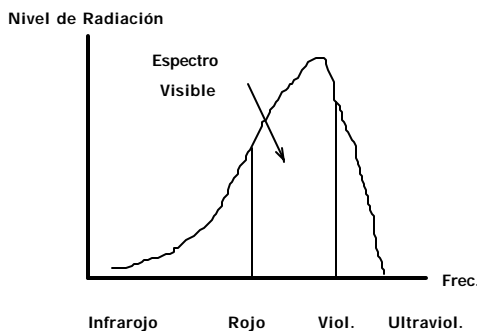


Fig 1.1- Espectro Luminoso de la Luz Solar

El “color” de la luz solar depende de la composición del espectro de frecuencias. Los fabricantes de focos luminosos, concientes de este fenómeno, tratan de dar a éstos un espectro de radiación luminosa similar al de la luz solar que llega a la Tierra cuando el sol alcanza la posición del zenith (luz blanca). La intensidad y frecuencias del espectro luminoso generado por el sol sufre alteraciones cuando la luz atraviesa la atmósfera. Ello se debe a la absorción, reflexión y dispersión que toma lugar dentro de ésta. Los gases presentes en la capa atmosférica actúan como filtros para ciertas frecuencias, las que ven disminuídas su intensidad o son absorbidas totalmente. El proceso fotovoltaico *responde a un limitado rango de frecuencias* dentro del espectro visible, de manera que es importante definir el espectro de radiación de la fuente luminosa que se utiliza para evaluar la celda fotovoltaica. Esto se hace especificando un parámetro denominado Masa de Aire.

MASA DE AIRE

La posición relativa del sol respecto a la horizontal del lugar determina el valor de la masa de aire. Cuando los rayos solares caen formando un ángulo de 90° respecto a la horizontal, se dice que el sol ha alcanzado su zenit.

CAPITULO 1- LA RADIACION SOLAR

Para esta posición la radiación directa del sol atraviesa una distancia mínima a través de la atmósfera. Cuando el sol está más cercano al horizonte, esta distancia se incrementa, es decir, la “masa de aire” es mayor. La Fig. 1.2 ilustra esta situación.

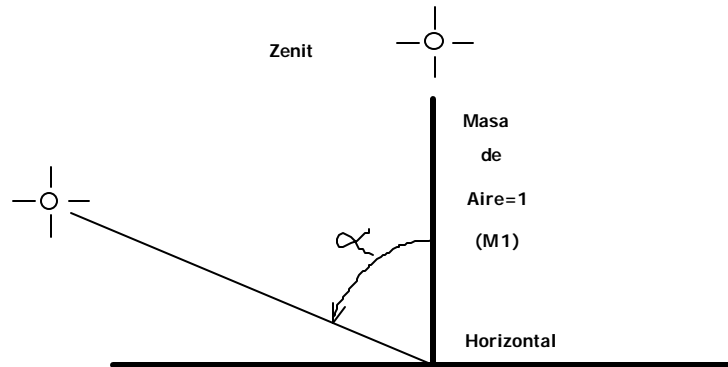


Fig. 1.2- Masa de Aire

A la posición del zenit se le asigna una masa de aire igual a 1 (M1). Cualquier otra distancia tendrá una masa de aire que puede calcularse usando la expresión:

$$\text{Masa de Aire} = 1 / \cos\alpha$$

donde α es el ángulo formado entre la posición de zenit y la posición del sol en ese momento, y $\cos\alpha$ es el valor del coseno de ese ángulo, el que varía entre 1 y 0 cuando el ángulo varía entre 0 y 90°. Para valores de α mayores que cero, el valor del $\cos\alpha$ es siempre menor que la unidad, de manera que el valor de la masa de aire se incrementa. Valores para la masa de aire mayores que la unidad indican que la radiación directa debe atravesar una distancia mayor dentro de la atmósfera. El ángulo de inclinación respecto a la posición del zenit (vertical) puede ser calculado de la expresión anterior. Se deduce así que una masa de aire de valor 1,5 corresponde a un ángulo α de unos 48°. Algunos autores asignan, arbitrariamente, el valor $M=0$ para el espectro luminoso fuera de la atmósfera. Este valor carece de sentido matemático.

VARIACION DEL ESPECTRO LUMINOSO

Al incrementarse la distancia, la absorción, reflexión y dispersión de la luz solar también se incrementan, cambiando el rango de frecuencias que integran el espectro luminoso, así como la intensidad del mismo. Esto explica las variaciones de intensidad y color de la luz solar durante la salida y puesta del sol. La fuente luminosa usada para medir la potencia de salida de un panel FV tiene un espectro luminoso correspondiente a una masa de 1,5 (M1,5), el que ha sido adoptado como estándar. La intensidad es muy cercana a $1\text{KW}/\text{m}^2$.

INSOLACION

La cantidad total de radiación solar (directa y reflejada) que se recibe en un punto determinado del planeta, sobre una superficie de 1 m^2 , para un determinado ángulo de inclinación entre la superficie colectora y la horizontal del lugar, recibe el nombre de insolación. El término deriva de la palabra inglesa *insolation*, la que, a su vez, representa un acronismo derivado de otras tres palabras del mismo idioma: *incident solar radiation* (radiación solar incidente).

CAPITULO 1- LA RADIACION SOLAR

El valor de la insolación en una dada locación debe reflejar el *valor promedio* de la misma. Para obtenerlo, se necesita tener en cuenta las variaciones cíclicas estacionales, conduciendo mediciones de la radiación solar diaria durante 10 ó más años. En los Estados Unidos de Norteamérica, esta tarea es llevada a cabo por el National Renewable Energy Laboratory (NREL) con sede en Golden, Colorado, desde 1961. Las mediciones de insolación diaria se toman usando colectores fijos, con distintos ángulos de inclinación con respecto a la horizontal, así como colectores móviles (los que siguen la trayectoria del sol automáticamente). El Centro de Estudios para la Energía Solar (Censolar) publica datos para la insolación media, en un plano horizontal, para una multitud de países en el mundo.

UNIDADES DE MEDIDA

Se usan diferentes unidades para expresar el valor de la insolación de un lugar. La más conveniente para nuestra aplicación es el Kilowat.hora por metro cuadrado (KWh/m²), o su valor equivalente en miliwat.hora por centímetro cuadrado (mWh/cm²). Si la energía del sol se utilizare para calentar agua, resulta más conveniente usar como unidad las calorías por metro cuadrado (Cal/m²) o los Btu/f² (*British thermal units* por pié cuadrado). La reducción de una cantidad a la otra puede hacerse recordando que $1\text{KWh/m}^2 = 860\text{ Cal/m}^2 = 317.02\text{ Btu/f}^2$.

VARIACION DE LA INSOLACION

Si la superficie colectora mantiene un ángulo de inclinación fijo, el valor de la insolación en una dada locación depende de las condiciones atmosféricas y la posición del sol respecto del horizonte. La presencia de nubes incrementa la absorción, reflexión y dispersión de la radiación solar. Las zonas desérticas, dada la carencia de nubes, tienen los mayores valores de insolación en el planeta. La posición del sol respecto a la horizontal cambia durante el día y con las estaciones. El valor de la insolación al amanecer y al atardecer, así como en el invierno, es menor que el del mediodía o el verano.

IRRADIACION: EL SOL

Irradiación es el valor de la potencia luminosa. Los fabricantes de paneles fotovoltaicos (FVs) determinan la máxima potencia eléctrica de salida *usando una fuente con una potencia luminosa de 1 KW/m²*. Este valor, conocido con el nombre de SOL, se ha convertido en un estandar para la industria, facilitando la comparación de paneles de distintos orígenes. Recordando que $1\text{ m}^2 = 10.000\text{ cm}^2$, y que $1\text{ KW} = 1.000\text{ W}$, se tiene que:

$$1\text{ SOL} = 1\text{ KW/m}^2 = 100\text{ milliwatts/cm}^2$$

Las dos cantidades son usadas, indistintamente, en las especificaciones de paneles FVs.

DIA SOLAR PROMEDIO

El valor de la irradiación varía al variar la masa de aire, la que cambia constantemente desde el amanecer al anochecer. Para simplificar el cálculo de la energía eléctrica generada diariamente por un panel FV, se acostumbra a definir el *día solar promedio*. Este valor es el número de horas, del total de horas entre el amanecer y el anochecer, durante el cual el sol irradia con una potencia luminosa de 1 SOL. Supongamos, como ejemplo, que el promedio de insolación diaria en una locación es de 5 KWh/m². Si este valor es dividido por un SOL, se obtiene el valor (en horas) del día solar promedio para esa locación y esa inclinación.

CAPITULO 1- LA RADIACION SOLAR

En nuestro ejemplo:

$$\text{DIA SOLAR} = \frac{5 \text{ KWh/m}^2}{1 \text{ KW/m}^2} = 5 \text{ horas}$$

Recordando que los paneles son evaluados usando una intensidad luminosa de un SOL, ***la duración del día solar promedio representa la cantidad de horas, del total de horas de luz diaria, en que el panel es capaz de generar la potencia máxima de salida especificada por el fabricante.***

PRESENTACION DE LOS DATOS El NREL publica, en forma periódica, los valores de insolación promedio, para una dada locación, usando colectores fijos con cinco ángulos de inclinación: horizontal: (0°), latitud del lugar menos 15°, latitud, latitud más 15°, y vertical (90°). Estos datos son complementados con mediciones tomadas usando superficies colectoras móviles, las que son montadas en aparatos que, automáticamente, siguen la trayectoria del sol. Este último tema será tratado en detalle en el Capítulo 8. La información mensual proporciona, además, los valores de insolación máxima y mínima registrados para ese período.

Complementando los datos de insolación, se tienen datos meteorológicos de la máxima y mínima temperatura, porcentaje de humedad relativa, y velocidad promedio del viento para la locación. Un dato importante, el de los ***días consecutivos promedio sin sol***, no forma parte de la información, a pesar de su importancia en la determinación de la reserva de energía (banco de baterías), como veremos más adelante.

El ángulo de inclinación de la superficie colectoras es el que ésta forma con la horizontal, tal como lo ilustra la Figura 1.3

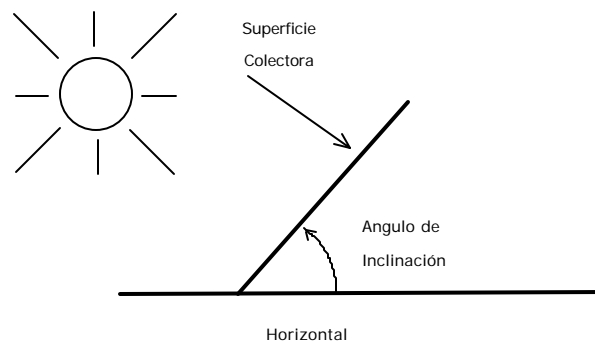


Fig.1.3- Angulo de Inclinación

Con las estaciones, la altura del sol respecto a la horizontal cambia al alcanzar el zenit. La diferencia de altura respecto a la horizontal varía con la latitud del lugar. Para las locaciones donde el cambio de altura es apreciable, la variación del ángulo de inclinación permite que los rayos solares incidan casi perpendicularmente sobre la superficie colectoras durante todo el año, lo que incrementa el nivel de energía que puede ser transformada.

CAPITULO 1- LA RADIACION SOLAR

El ángulo deberá incrementarse cuando la altura del sol sobre el zenit es la menor. En estas locaciones, la duración del día solar promedio, para una misma estación, varía en función del ángulo de inclinación.

LATITUD
LATITUD +15°
LATITUD - 15°

Una forma universal de presentar los valores de insolación es usar, como referencia, un ángulo de inclinación para la superficie colectora que es igual al de la latitud del lugar. Los valores así obtenidos son complementados con mediciones hechas con ángulos de inclinación que varían +/-15° respecto al valor de referencia.

RADIACION
SOLAR
EN LAS
AMERICAS

Las Figuras 1.4 a 1.15 muestran los valores promedios para la radiación solar en el continente americano, durante un año, para tres ángulos de inclinación de los paneles respecto a la horizontal del lugar: latitud, latitud más 15° y latitud menos 15°. Estas cantidades representan, asimismo, la duración (en horas) del día solar promedio. En estos mapas se usa un punto, en lugar de la coma, para separar la cantidad decimal (notación típica de los EEUU de América).

CAPITULO 1- LA RADIACION SOLAR

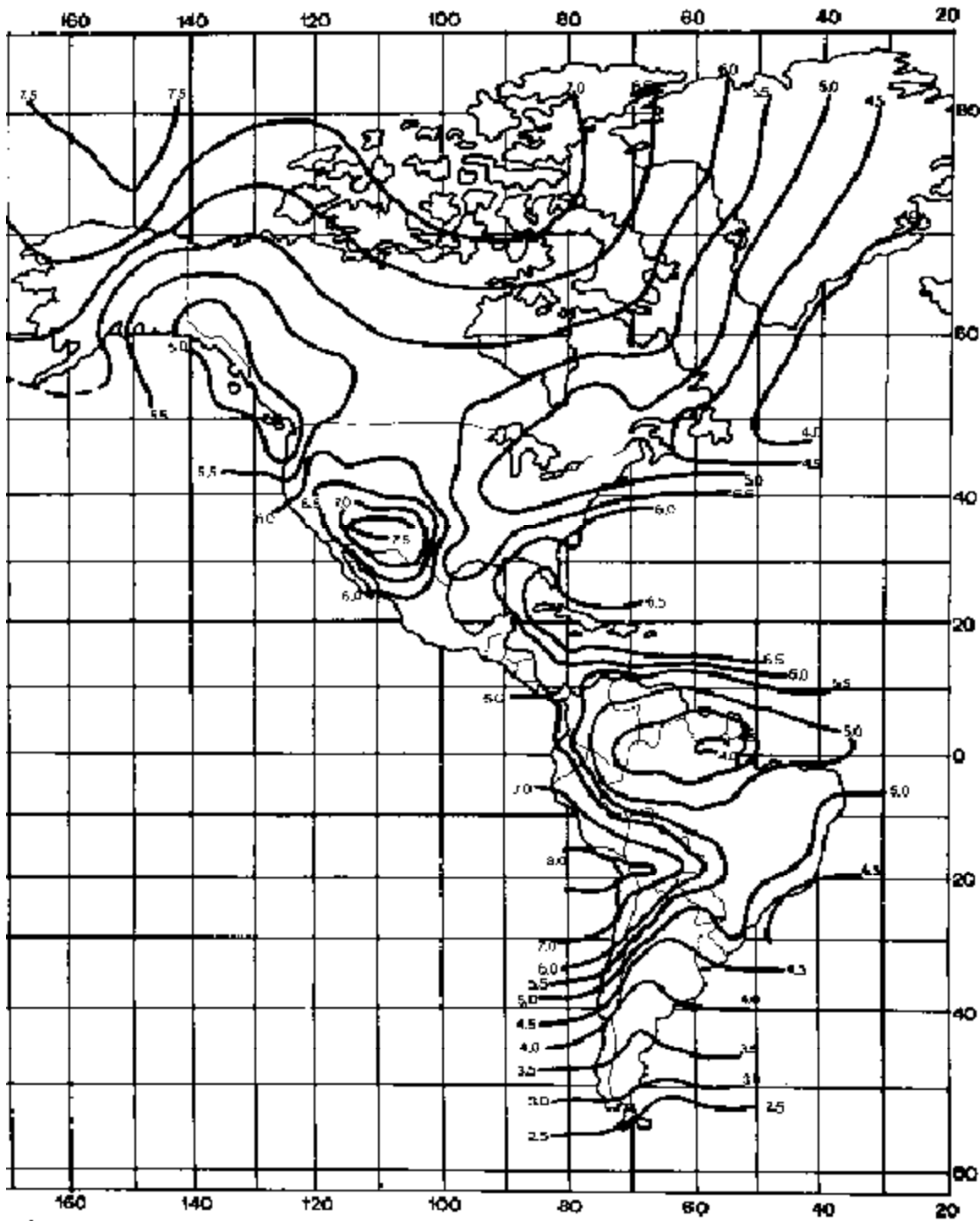


Fig. 1.4- DURACION DEL DIA SOLAR

Inclinación: LATITUD
Norte del Ecuador: Primavera
Sur del Ecuador: Otoño

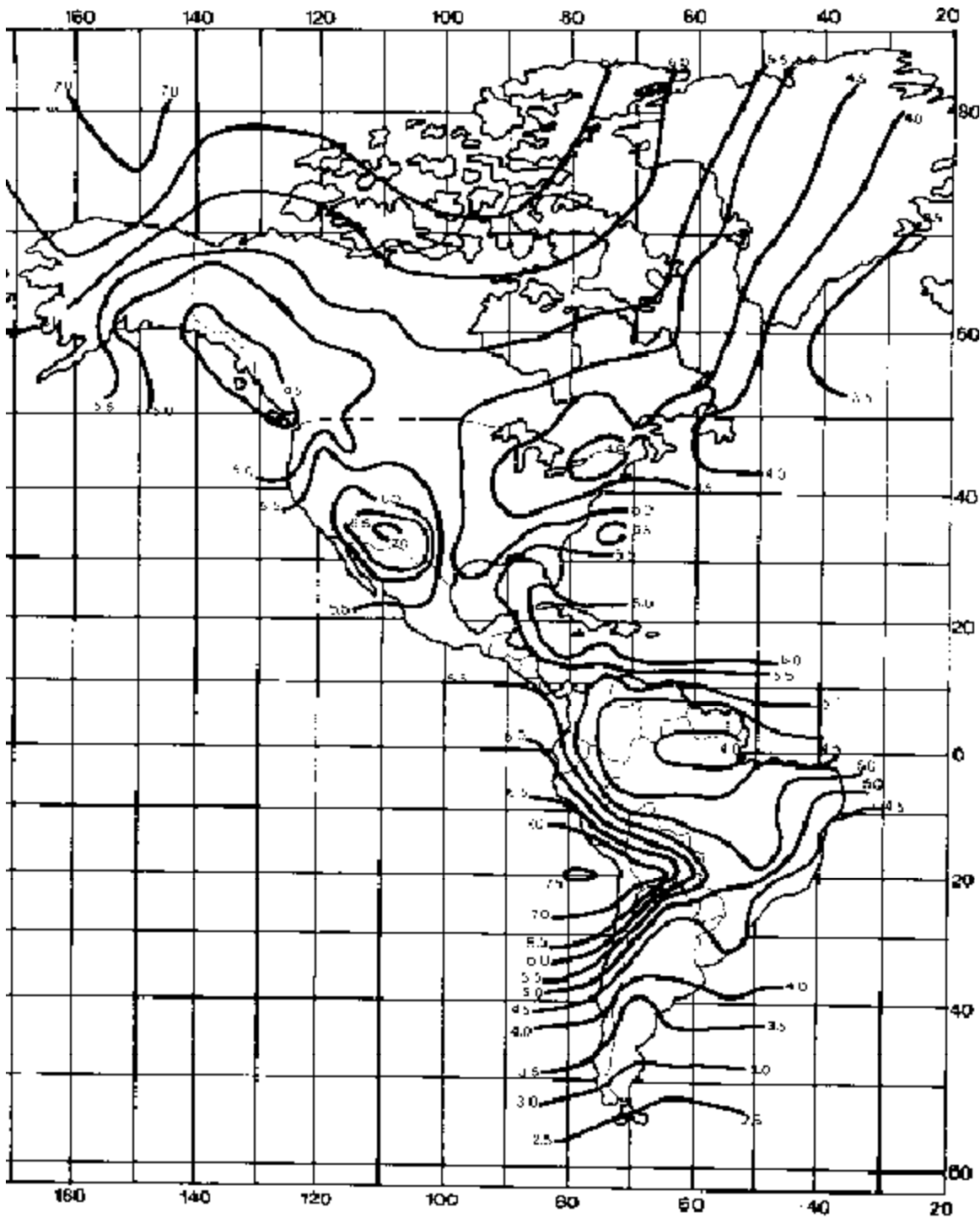


Fig. 1.5- DURACION DEL DIA SOLAR

Inclinación: LATITUD + 15°
Norte del Ecuador: Primavera
Sur del Ecuador: Otoño

CAPITULO 1- LA RADIACION SOLAR

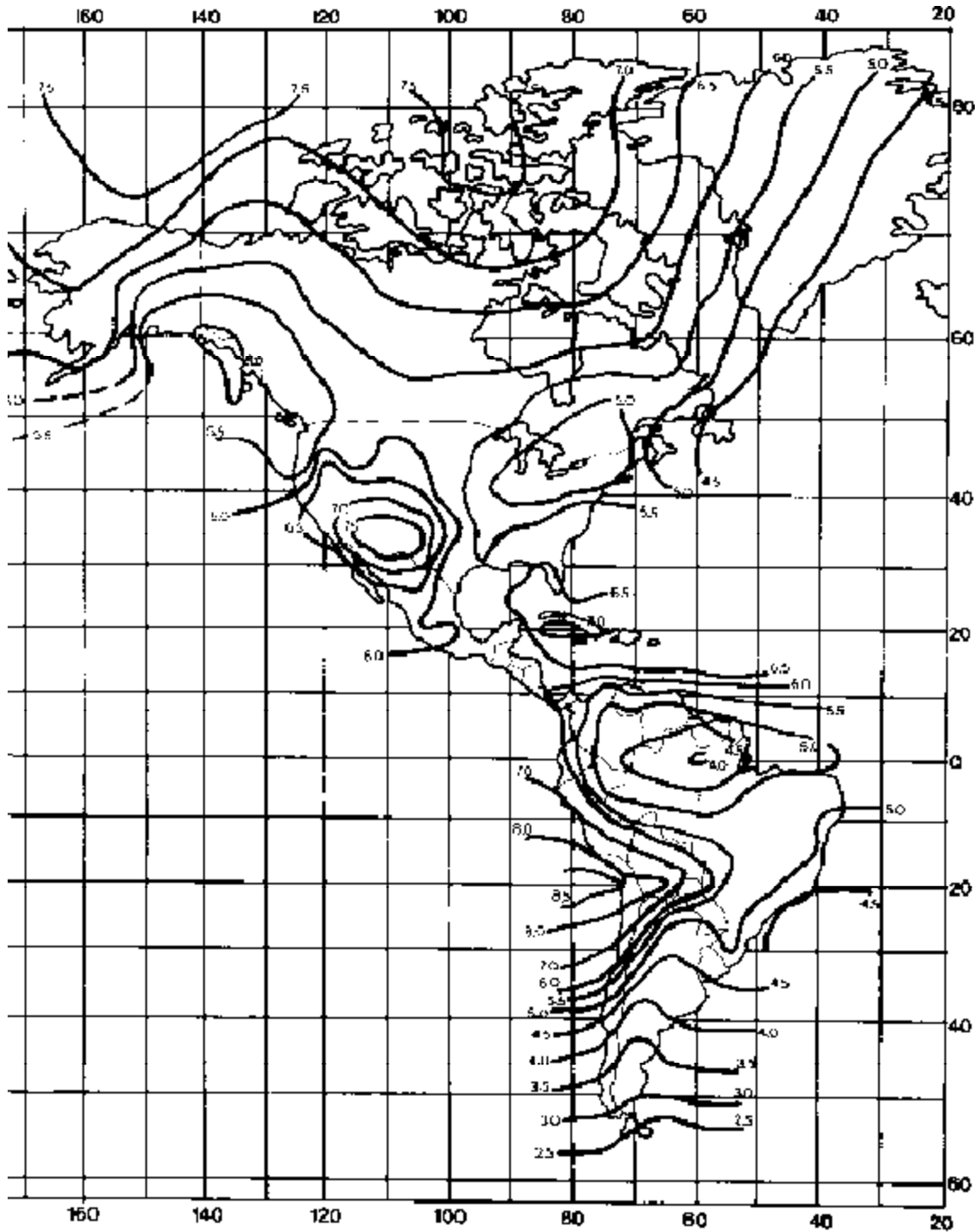


Fig. 1.6- DURACION DEL DIA SOLAR

Inclinación: LATITUD - 15°
Norte del Ecuador: Primavera
Sur del Ecuador: Otoño

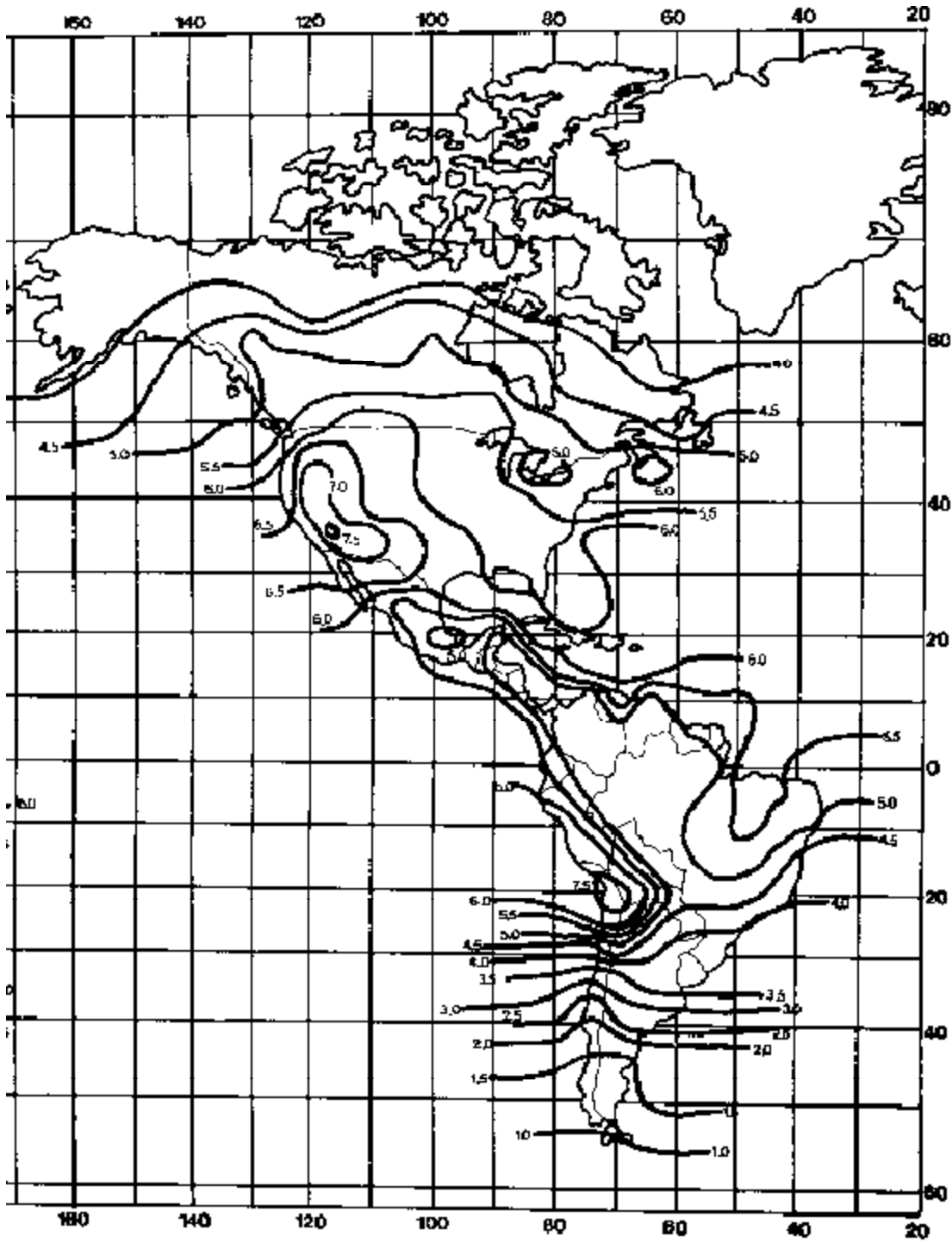


Fig. 1.7- DURACION DEL DIA SOLAR

Inclinación: LATITUD

Norte del Ecuador: Verano

Sur del Ecuador: Invierno

CAPITULO 1- LA RADIACION SOLAR

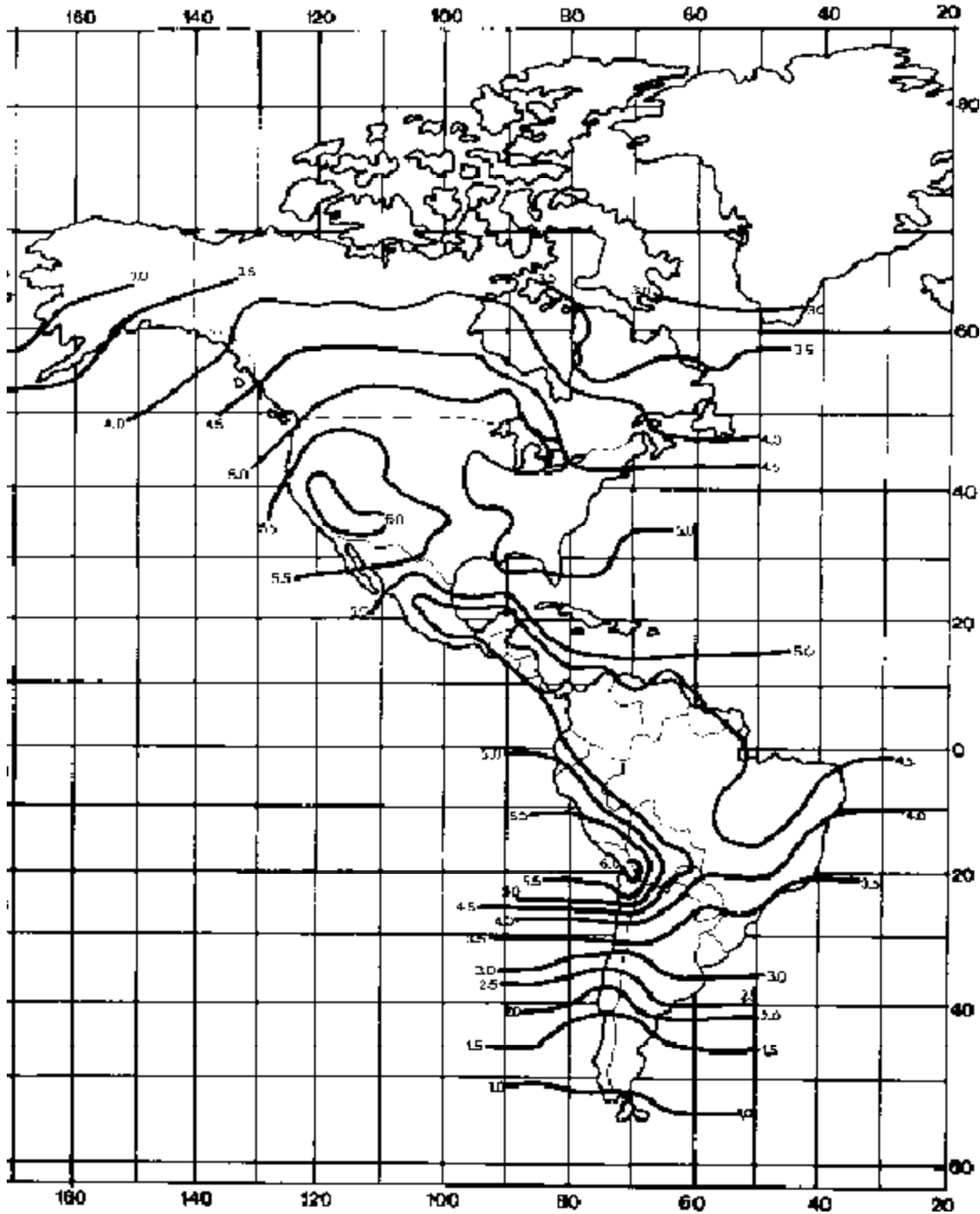


Fig. 1.8- DURACION DEL DIA SOLAR

Inclinación: $LATITUD + 15^\circ$

Norte del Ecuador: Verano

Sur del Ecuador: Invierno

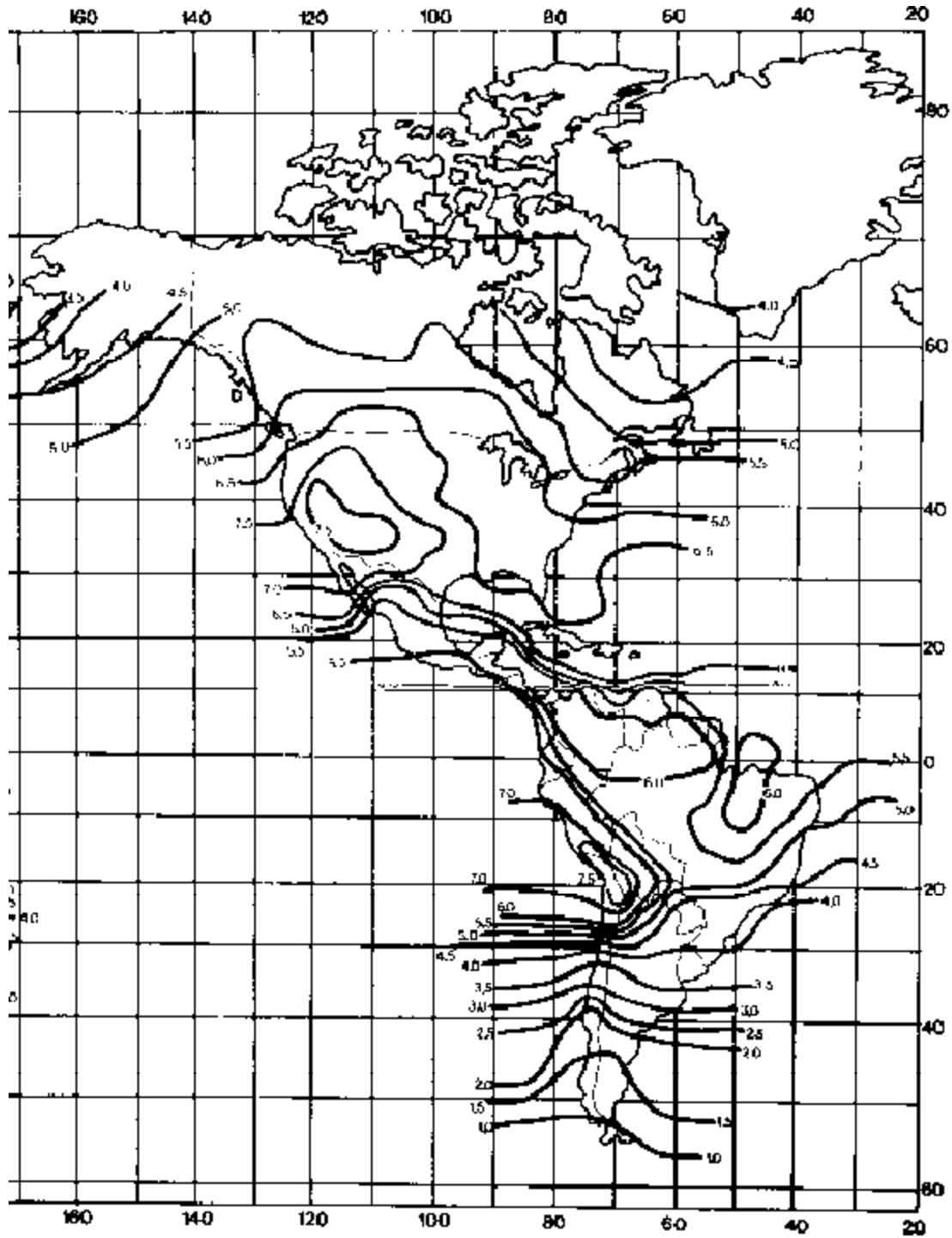


Fig. 1.9- DURACION DEL DIA SOLAR

Inclinación: LATITUD - 15°

Norte del Ecuador: Verano

Sur del Ecuador: Invierno

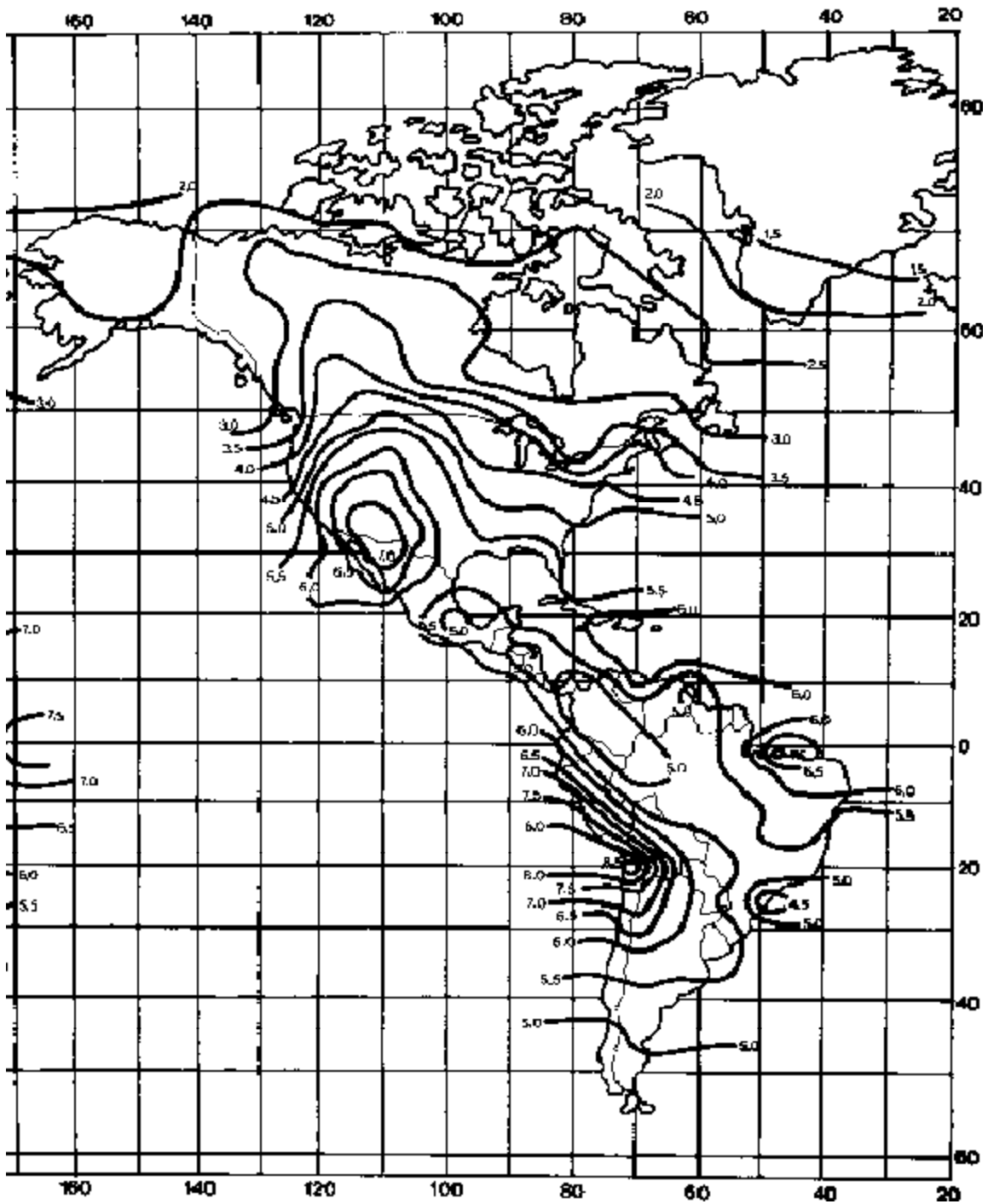


Fig. 1.10- DURACION DEL DIA SOLAR

Inclinación: LATITUD
Norte del Ecuador: Otoño
Sur del Ecuador: Primavera

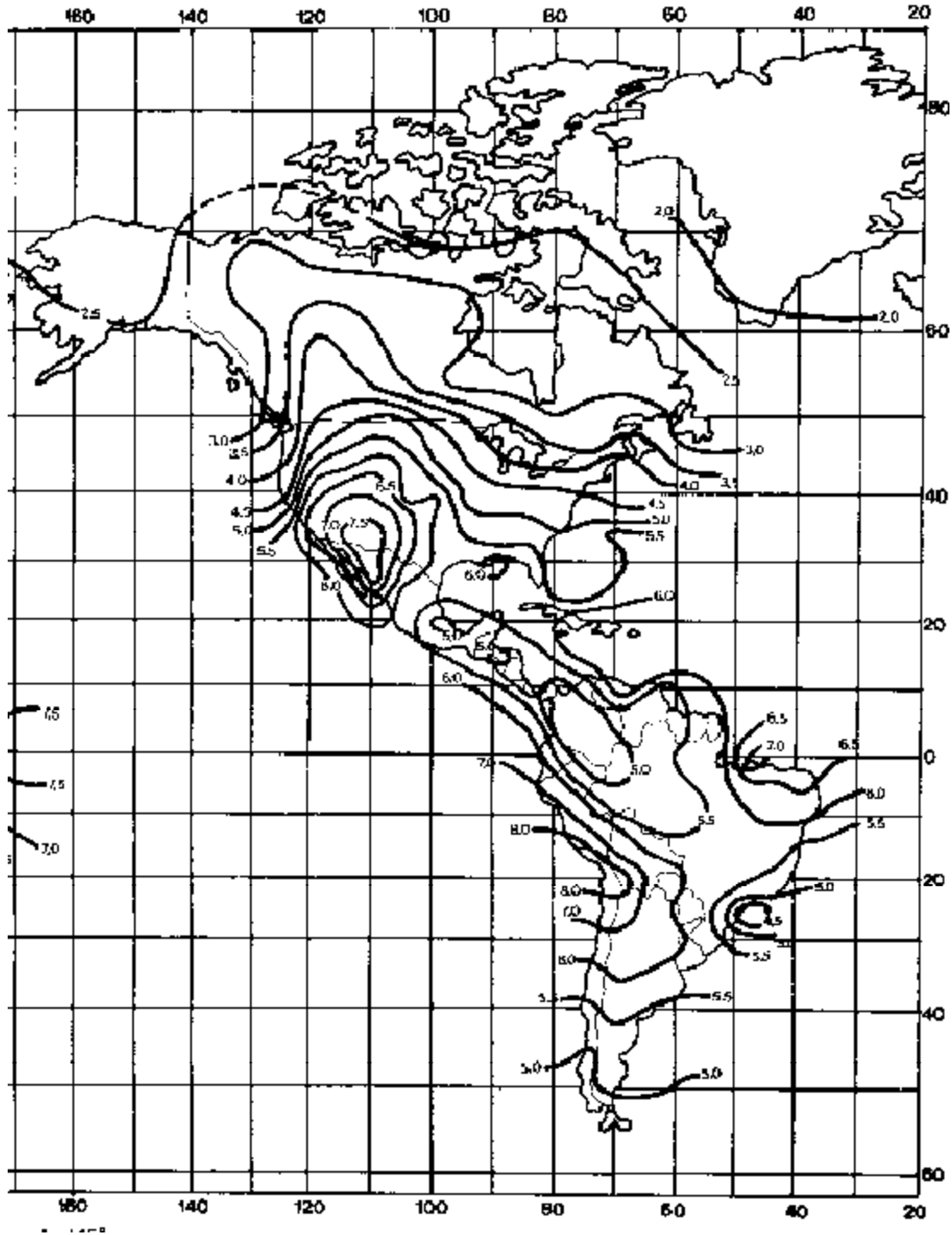


Fig. 1.11- DURACION DEL DIA SOLAR

Inclinación: $LATITUD + 15^\circ$

Norte del Ecuador: Otoño

Sur del Ecuador: Primavera

CAPITULO 1- LA RADIACION SOLAR

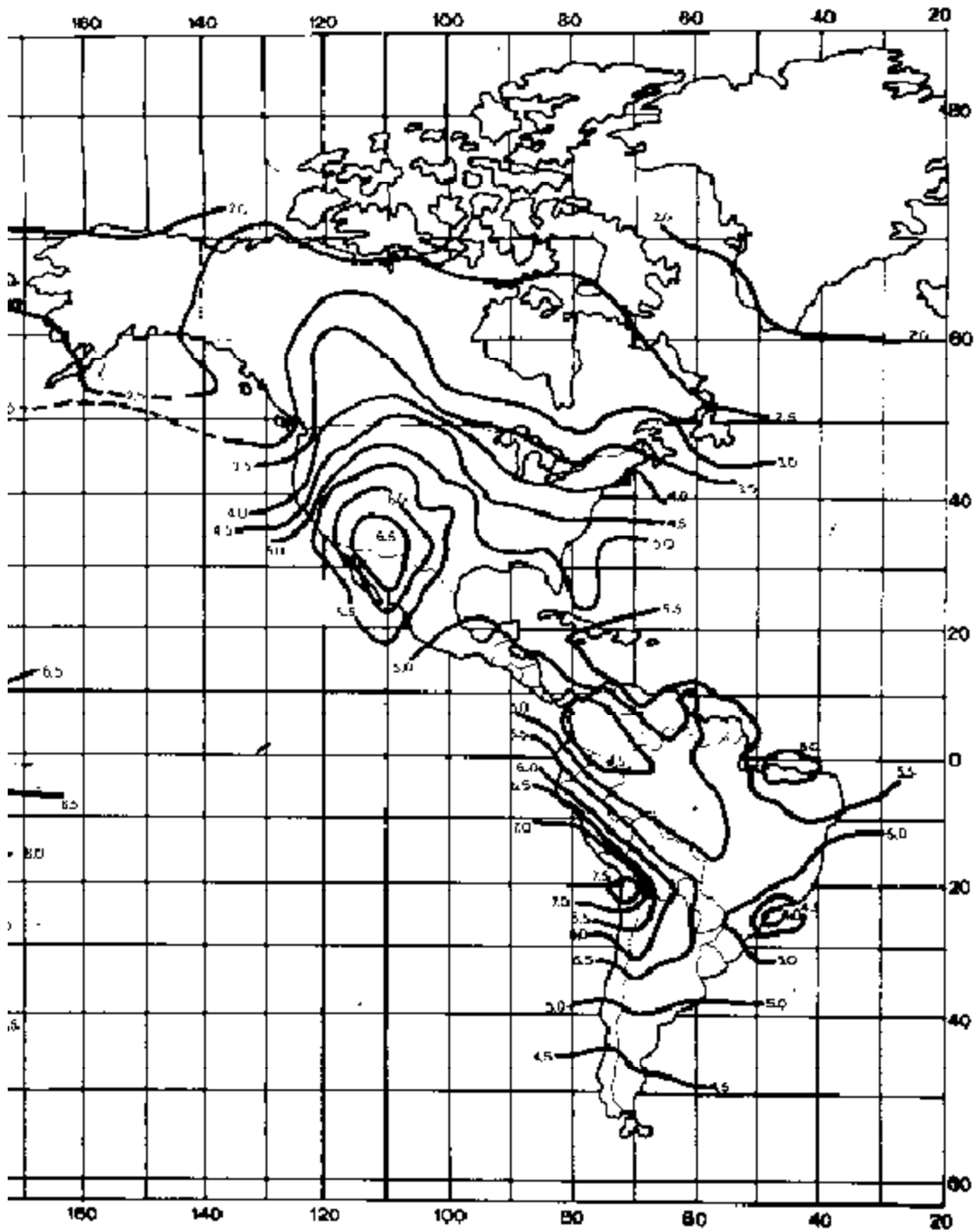


Fig. 1.12- DURACION DEL DIA SOLAR

Inclinación: LATITUD - 15°

Norte del Ecuador: Otoño

Sur del Ecuador: Primavera

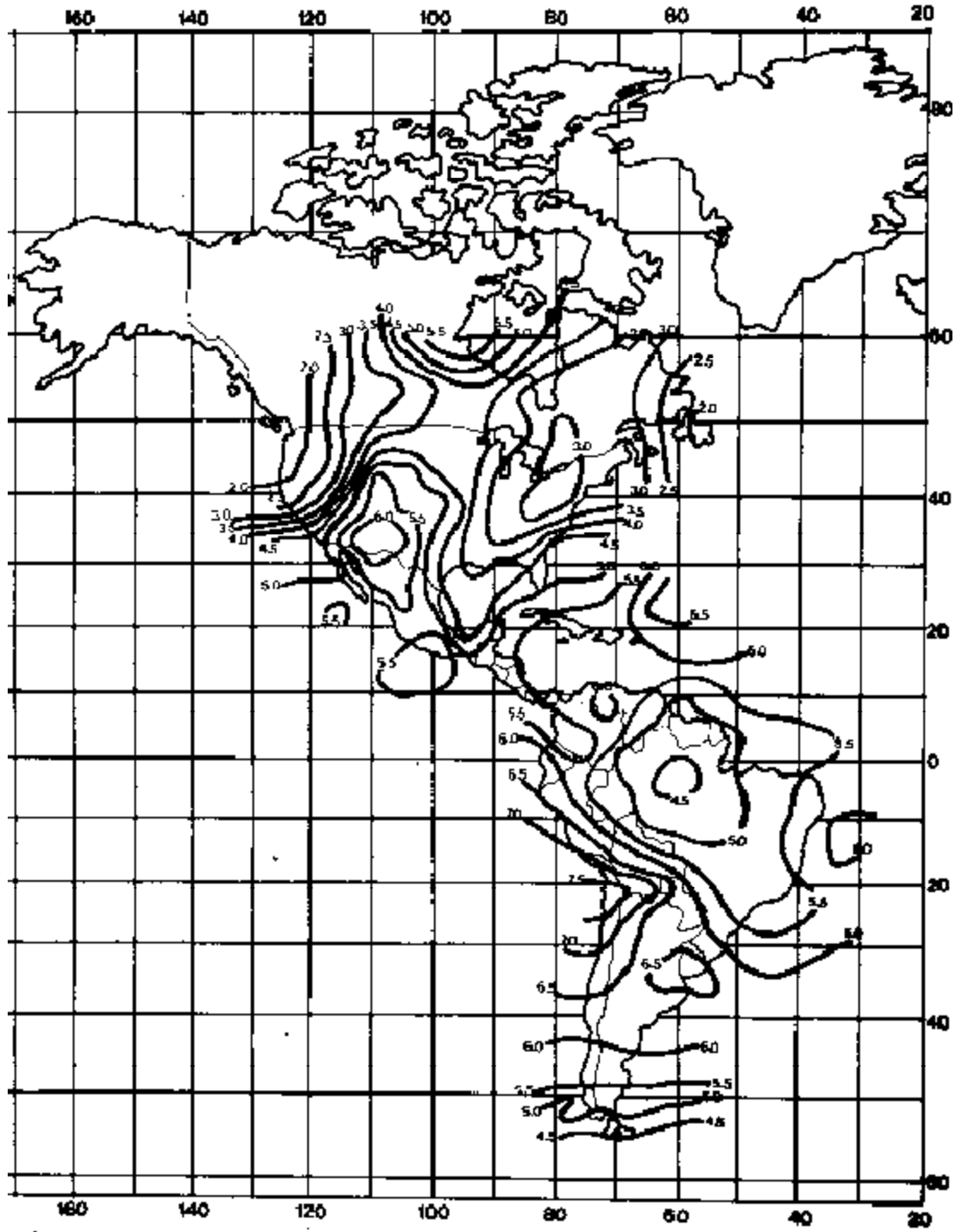


Fig. 1.13- DURACION DEL DIA SOLAR

Inclinación: LATITUD
Norte del Ecuador: Invierno
Sur del Ecuador: Verano

CAPITULO 1- LA RADIACION SOLAR

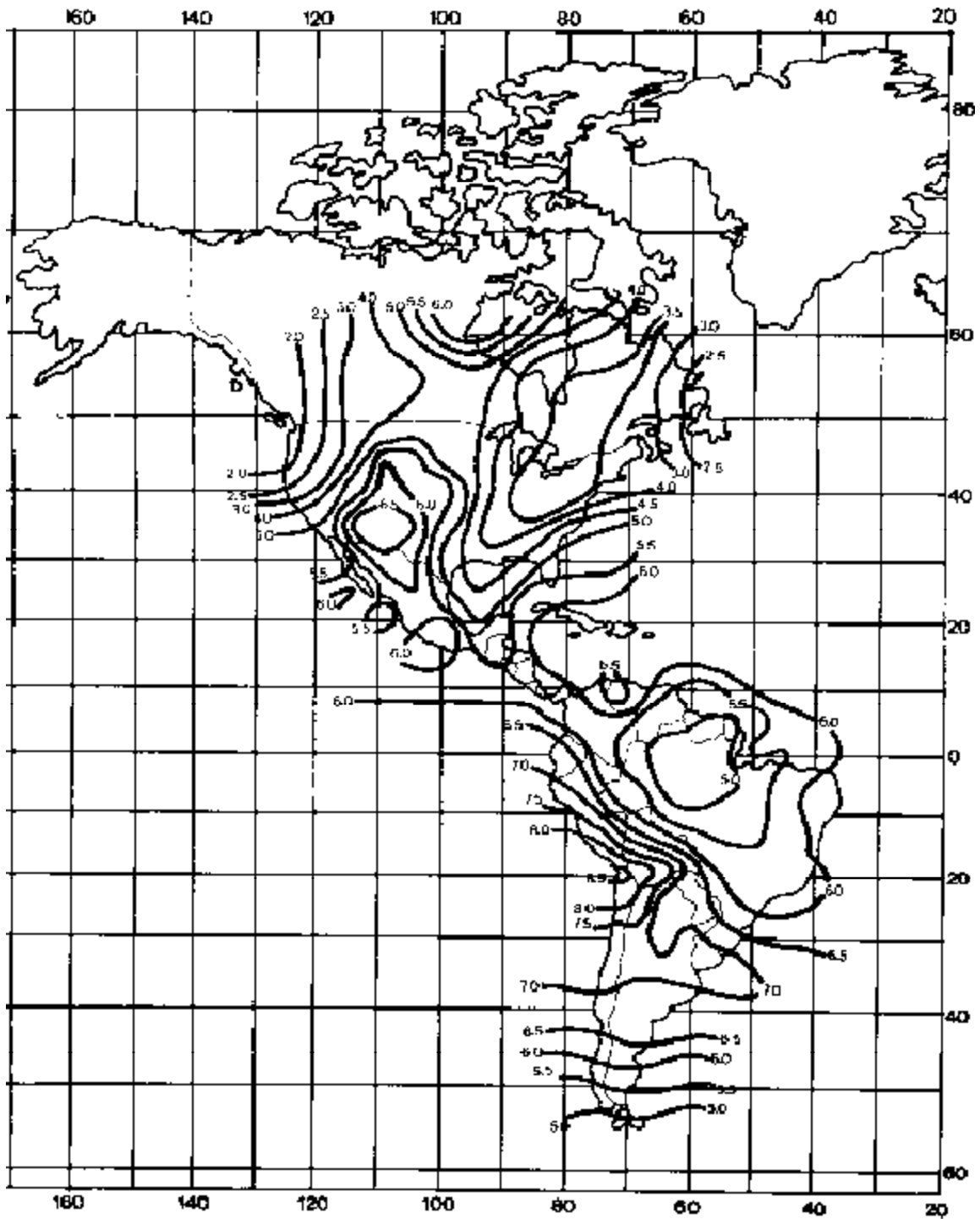


Fig. 1.14- DURACION DEL DIA SOLAR

Inclinación: LATITUD +15°

Norte del Ecuador: Invierno

Sur del Ecuador: Verano

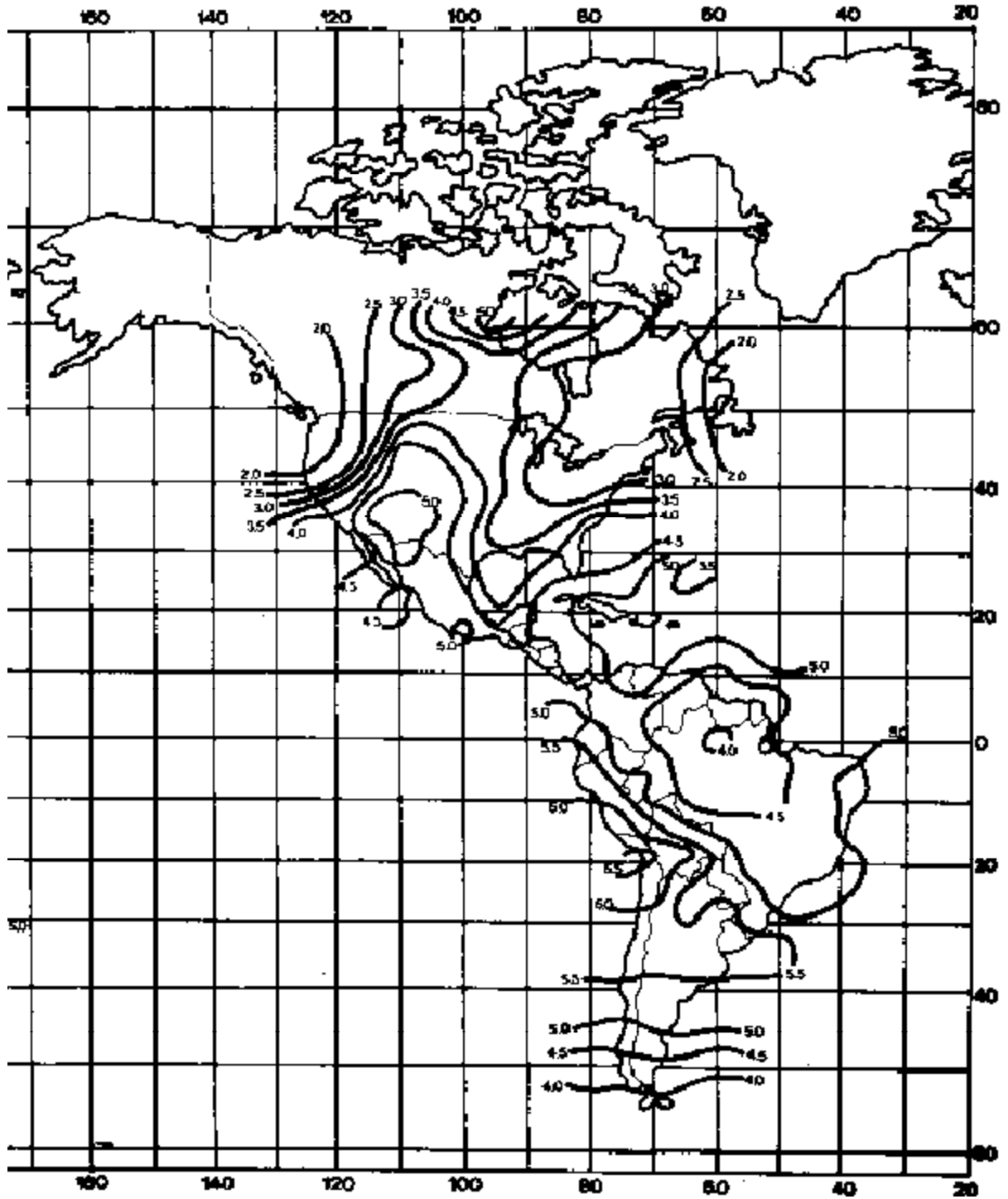


Fig. 1.15- DURACION DEL DIA SOLAR

Inclinación: LATITUD -15°

Norte del Ecuador: Invierno

Sur del Ecuador: Verano

CAPITULO 1- LA RADIACION SOLAR