

RELACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR CON LA PRODUCCIÓN DE PLANTAS: AGROPRODUCTIVAS

Relationship between solar radiation and plant production: agro-productive plants

Julio Montero Torres¹

RESUMEN

En la galaxia están presentes el Sol y la Tierra, en la que, existen diversos organismos, como las plantas. El propósito del estudio, es enfatizar la relación y el rol de la radiación solar en la producción en sistemas agroproductivos, como es el caso, de la producción de hortalizas bajo invernadero, conjuntamente su entorno y los fenómenos químicos y físicos. Por tanto, se ha logrado, obtener información sobre el rol de la luz, el dióxido de carbono y el agua en la fotosíntesis, y por consiguientemente, en la producción de plantas que están condicionados, a su ubicación en el planeta Tierra, respecto a latitud y longitud, y a los efectos de las variaciones del clima en el mundo. Una de las relevancias, es la variabilidad de la tasa de la fotosíntesis, que es vital, para la producción de plantas, a través del consumo, de dióxido de carbono. Por otra, se ha verificado, la correlación de las reacciones químicas y los fenómenos físicos, en los procesos de la fotosíntesis y la generación de biomasa. También, se ha encontrado, un análisis de requerimiento de la radiación solar, en cultivos hortícolas en Holanda, España y México. Asimismo, se revisó, algunas referencias de la presencia, del efecto invernadero, el cambio climático en Bolivia y la producción en invernaderos en el altiplano.

Palabras clave: Altiplano, Bolivia, energía, fotosíntesis, luz, radiación solar.

ABSTRACT

The Sun and the Earth are present in the galaxy, in which there are several organisms, such as plants. The purpose of the study is to emphasize the relationship and the role of solar radiation in the production of agricultural production systems, as is the case of greenhouse vegetable production, together with its environment and chemical and physical phenomena. Therefore, it has been possible to obtain information on the role of light, carbon dioxide and water in photosynthesis, and consequently, in the production of plants that are conditioned to their location on the planet Earth, with respect to latitude and longitude, and the effects of climate variations in the world. One relevance is the variability of the rate of photosynthesis, which is vital for plant production through the consumption of carbon dioxide. On the other hand, the correlation of chemical reactions and physical phenomena in the processes of photosynthesis and biomass generation has been verified. Also, an analysis of solar radiation requirements in horticultural crops in Holland, Spain and Mexico has been found. Likewise, some references on the presence of the greenhouse effect, climate change in Bolivia and greenhouse production in the altiplano were reviewed.

Keywords: Altiplano, Bolivia, energy, photosynthesis, light, solar radiation.

¹ ✉ Docente, Universidad Mayor Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, Facultad de Ciencias Agrarias, Facultad de Ciencias y Tecnología, Bolivia. ORCID: [0000-0002-1575-3422](https://orcid.org/0000-0002-1575-3422). monterotj@hotmail.com

INTRODUCCIÓN

El sistema solar es una pequeña parte de la galaxia, parecida a una esfera con un radio de 50-100 AU (unidad astronómica) con el Sol al centro, donde 1 AU es la distancia media entre el Sol y la Tierra y es igual a 149.6 millones de km (Figura 1); su campo magnético solar dentro de la heliósfera está adherido al viento solar, y su plasma que emerge del sol y fluye hacia el exterior desarrollando una velocidad media de 400 kms^{-1} (Swenberg et al., 1991; Stix, 2004). El Sol es la fuente primaria, de energía radiante, propagada a través del espacio, en forma de pulsaciones u ondas; desde el punto de vista corpuscular, la radiación solar (RS) consiste en un flujo de paquetes de energía denominado cuanto o fotón, propagadas ondulatoriamente. Su parámetro es la longitud de onda (λ) y el conjunto diverso, de radiación de la RS, es conocido como espectro electromagnético (Figura 2).

Tiene, un rango de intervalo de longitud de onda, de 100-5 000 nanómetros (nm), visible de 380-760 nm para el ser humano (espectro visible); la luz es una energía radiante, con capacidad de producir sensaciones visuales, y el color lo aprecia el ojo humano, junto a sus características de ondas que emite un determinado objeto. La energía, que emite una cantidad de radiación, está relacionada matemáticamente, a su longitud de onda, donde: $E=hc$, donde "h" es la constante de Planck, "c" es la velocidad con que la radiación solar se propaga en el vacío, " λ " la longitud de onda y " ν " la frecuencia; pero ($c=\lambda\nu$). Por consiguiente, después de millones de años de evolución, las plantas aprovechan estas radiaciones, como son la longitud de onda larga, que son menos energéticas que la longitud de onda corta. Partiendo, del espectro visible, la zona más energética, corresponde al violeta de 390-430 nm, y la menos energética es el rojo de 650-700 nm, siendo importante por ejemplo en cámaras de crecimiento y sistemas de apoyo luminoso.

La distribución espectral de la RS, está condicionado a factores, de variaciones, como la masa de aire, que atraviesa al amanecer o al nivel del mar se atenúan la radiación de longitud de onda corta (violeta, azul), donde la luz, tiene más zona roja; este efecto, disminuye a medida que el sol, está en posición cenital o aumento de altitud. Asimismo, se considera la elevación del Sol, el cual varía según la estación del año y hora del día. La relación roja/infrarrojo, es máxima al mediodía y mínima al anochecer; en verano,

hay más infrarrojo, que en invierno (Curt, et al., 1991; Taiz y Zeiger 2006; Petela, 2010; Espinoza, 2017; IDEAM, 2022).

La RS es uno de los factores ambientales, más importantes, que afectan la vida (Figura 3) en el planeta Tierra, este controla los diversos ecosistemas (terrestres y acuáticos), a través de procesos fotobiológicos como: fotosíntesis, fotoperiodo y fototropismos. Incidiendo, además, sobre otros factores ambientales, como la temperatura y humedad; y ciclos naturales (diarios, anuales, hídricos) que determinan la distribución final de los organismos (Carrasco-Ríos, 2009). La RS es fuente, de energía, para el crecimiento y desarrollo de las plantas e insumo principal de la bioproduktividad vegetal. La parte, útil de la RS, para la fotosíntesis, se denomina radiación fotosintéticamente activa o luz (PAR) (Figura 2); en la que, la radiación incidente, determina, las características agroclimáticas, de cada zona (PROAIN, 2020a).

En este contexto, la primera opción, como fuente alternativa, de energía renovable, es la energía solar, que, permite desarrollar una fuente de energía global, accesible y descentralizada, para su uso, en todas las zonas climáticas, del mundo, sin costo; pero, la tecnología, para recolectarla y convertirla en energía utilizable, podría ser costosa. Ésta energía, se irradia, desde el Sol, hacia el espacio, en todas las direcciones, en forma de radiaciones electromagnéticas o rayos solares; pero, según, la latitud y el patrón climático regional, de una determinada ubicación, en la superficie de la Tierra, la cantidad promedio, de energía solar, radiada a la tierra, es aproximadamente de 1 kilovatio por metro cuadrado (kW m^{-2}) (Babatunde, 2012; Lovegrove y Stein 2012). En la relación establecida, entre el Sol y la Tierra, ocurren variaciones y efectos en función del tiempo, en diversas etapas y procesos directamente, entre las emisiones de la RS y los organismos que la reciben, como, en la fotosíntesis, de la cual, se tiene como resultado, la biomasa, donde, solo se considera, los procesos de nutrición del suelo y no de la relación Sol-Planta, que incide en la tasa de la fotosíntesis (Fernández y Tapias 2004). El objetivo, del estudio, es profundizar y apuntar la relación y rol de la RS en la producción, basados en sistemas agroproductivos, como es el caso de producción de hortalizas bajo invernadero. Para tal efecto, se ha realizado, la búsqueda de bibliografía, relacionada a la RS, fotosíntesis, fisiología vegetal, bioquímica, biofísica y otras publicaciones complementarias, relativas al origen de la vida, sistema solar y astronomía.

METODOLOGÍA

Para elaborar, el presente artículo de revisión, se realizó, una revisión desde 1927 al 2022 de boletines, folletos, libros, artículos, tesis, videos accesibles, en internet y en la base de datos de google académico, aplicando palabras clave como altiplano, Bolivia, energía, fotosíntesis, luz y radiación solar y hortalizas bajo invernadero.

LA RADIACIÓN SOLAR

En el marco biológico ambiental la RS, es determinante en la producción primaria, de sistemas agroproductivos (IICA, 2006). La naturaleza de la RS, trata, la radiación electromagnética, como una superposición de ondas, de varias longitudes de onda, con una densidad de potencia, asociada en vatios por

metro cuadrado ($W m^{-2}$), y por su parte, la teoría cuántica, considera, a la radiación, como una corriente de partículas, denominadas fotones, con masa en reposo y cuanto de energía nulos (Vieira y Ordoñez, 2021). En el pasado milenio, representado, por el período cálido medieval y la pequeña edad de hielo se evidencio, fluctuaciones del clima en la Tierra; lo cual se muestra, con la industrialización y los fenómenos naturales, en la Tierra, que posibilitan la variación de RS total (Rapp, 2014). En este contexto, en la RS se considera también el movimiento de la Tierra alrededor del Sol, alrededor de su eje polar y el ángulo entre el ecuador de la Tierra y el plano que contiene el sistema orbital Sol-Tierra (Iqbal, 1983). El espectroscopio, ha revelado en el Sol, la presencia, de hidrógeno (H_2) con un peso de casi $\frac{1}{2}$, de oxígeno (O_2) $\frac{1}{4}$ y de helio (He) más otros metales es el resto (Babor e Ibarz, 1949).

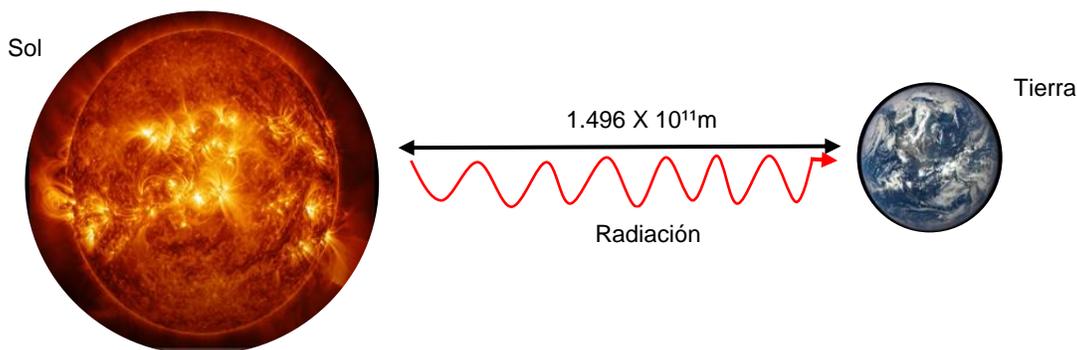


Figura 1. El Sol tiene, un diámetro de $1.39 \times 10^9 m$ y un peso aproximado de $2 \times 10^{30} kg$; y la Tierra, tiene un diámetro de $1.27 \times 10^7 m$ y un peso aproximado de $6 \times 10^{24} kg$, donde, el planeta Tierra, está en movimiento alrededor del Sol (Imágenes sin escala) (Iqbal, 1983; Resnick et al., 2001; Stix, 2004; NASA, 2020; Vieira y Ordoñez, 2021; Doran y Gallagher, 2022; NASA, 2022).

La RS que llega a la Tierra, está compuesto de a) radiación directa, b) radiación difusa y c) albedo que es el reflejo terrestre (30 %) en promedio del 100 % de la emisión del Sol (Zaratti et al., 2010; Martínez, 2016; MA, 2022). Por la insolación, la Tierra, se calienta y emite radiación terrestre con una longitud de onda más larga a 288 K, en relación a la longitud de onda del Sol, que es más corta a 6 000 K. La radiación terrestre de onda larga, es absorbida, por CO_2 , CH_4 , H_2O (Gases de efecto invernadero), cuyos gases, se calientan y parte de esta, vuelve a emitir radiación, hacia la Tierra; denominándose, efecto invernadero. Es un proceso natural y esto hace que exista vida en la Tierra, funciona, como una tapa y podría no ser malo. Dentro, del balance térmico, de la Tierra, sin efecto invernadero, la temperatura promedio, en la Tierra, sería de $-18^\circ C$, sin embargo, con el efecto invernadero, tenemos una temperatura promedio de $15^\circ C$. La radiación saliente, depende de la nubosidad y el tipo

de superficie, donde, según, el balance de la radiación térmica, del planeta, entra 100 % y sale 100 %. Las variaciones de la radiación, son diarias, anuales, por la latitud, albedo y nubosidad (MA, 2022). Según Cetto (1987), de toda la radiación emitida, por el Sol; la Tierra, recibe solamente, el 0.0000001 % y casi todo el resto, se escapa del sistema solar, pero, para Martínez (2016) la Tierra, recibe una energía de $5.46 \times 10^{24} W$. La radiación, es la energía, que se transmite, por medio de ondas electromagnéticas, que no requieren, de algún otro medio material, para propagarse y viajan a la velocidad de la luz ($299\ 792\ 458 m s^{-1}$). La cantidad, de radiación y longitud de onda, depende de la temperatura. La distribución, de la radiación es: luz visible 42 %, infrarrojo 49 %, ultravioleta 8 % y otros 1 %. Presenta, una constante solar de $1\ 367 W m^{-2}$. La radiación entrante, absorbida por la superficie terrestre en promedio es 51 %, y en un día, sin nubes 85 %. Sin embargo, el albedo, determina el porcentaje, de

radiación reflejada, por una superficie, en relación a la recibida (Stix, 2004; Chang y Goldsby, 2013; MA, 2022). La RS, se mide con celda fotovoltaica, piranómetro y el heliógrafo (Martínez, 2016; INFOCLIMA, 2022; Gonzales, 2022).

Luz y luminosidad

La fuente principal de luz, es el Sol, del cual recibimos, una iluminación grande, imposible de generar artificialmente. La RS fue un factor primario, para el origen y evolución de la vida, y para la ecología, del planeta; lo mantiene, con temperatura aceptable, evapora, el H₂O inicia, la fotosíntesis, que es la puerta de entrada, de la energía, en el ciclo biológico, además proporciona iluminación durante medio día; sin la luz del Sol no habría vida sobre la Tierra (Cetto, 1987). En el caso, de que las plantas, se encuentran, bien regadas, en un ambiente, de atmósfera, relativamente húmeda, la abertura estomática, se ajusta estrictamente, a la intensidad luminosa *PAR*, que se encuentra entre 400-700 nm, equivalente, a la densidad, de flujo de fotones fotosintéticos, donde, las estomas se abren en el día y se cierran por la noche. Hay dos sistemas, que participan en la percepción de la luz. En el primero, el *PAR*, induce la abertura estomática, siendo absorbido por los pigmentos clorofílicos de los cloroplastos, en las células oclusivas y que actúan, probablemente, a través de la provisión de energía en forma de *ATP* y solutos orgánicos, como el enzima malato (C₄H₆O₅).

Este sistema, es importante, cuando los niveles de luz (Figura 2), son relativamente elevados, al mediodía y podría ser esencial para una abertura estomática amplia. En el segundo, se presenta un sistema dependiente de la luz azul, cuya absorción, se lleva a cabo, en los cloroplastos (pigmentos xantofílico, zeaxantina) probablemente (Azcón-Bieto y Talon, 2008). En este modelo, es la luz azul la que activa la abertura estomática, promoviendo el bombeo de protones y la hidrólisis de almidón para producir malato por un parte y por otra, el fotosistema de la luz azul, es sensible a su intensidad, pero se satura a densidad de flujo menor, que el sistema *PAR* y no induce, la abertura estomática amplia. Al amanecer, se desencadena una abertura rápida, de las estomas, cuando la luz comprende longitudes de onda azules y en destellos solares breves. Por ejemplo, en especies de la orquídea tropical (*Paphiopedilum sp.*), de hábitat sombrío, sus células oclusivas, poseen plastos incoloros, en vez de cloroplastos y su respuesta a la

luz es mediada, por el fotosistema de la luz azul, con fotosíntesis limitada, por la disponibilidad de luz bajo sombra y sin CO₂. Por tanto, una abertura estomática amplia por el sistema *PAR* no sería necesaria, para obtener CO₂ (Azcón-Bieto y Talon, 2008).

La luz solar es fuente principal de energía para la biosfera, lugar donde vivimos en un sistema cerrado, en equilibrio dinámico constante según la termodinámica. Útil para la geología y biología del planeta que cobija la vida (Figura 3). El Sol es un astro, que irradia un espectro radiativo electromagnético que llega a la Tierra es de aproximadamente 40-51 % como radiación luminosa, llamada luz. Comparando la intensidad del Sol, con otra artificial, por ejemplo, un día de Sol al aire libre genera 2 000 μmol de fotones de luz por metro cuadrado por segundo (2 000 μmol m⁻²s⁻¹; en potencia unos 1 000 W m⁻²) (Azcón-Bieto y Talón, 2008; Resnick et al., 2009).

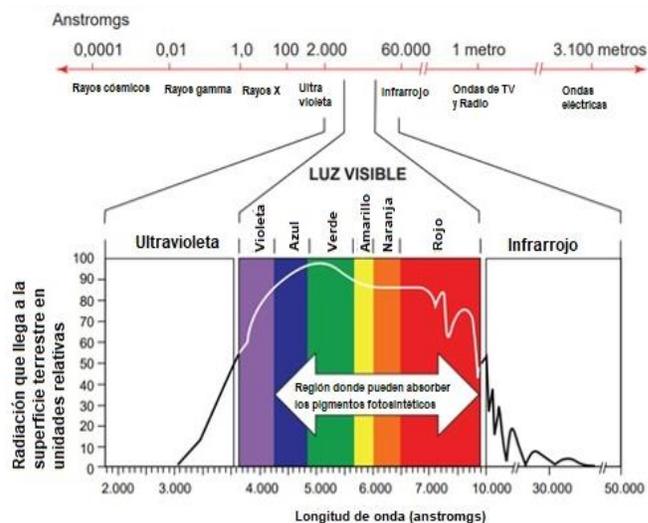


Figura 2. La radiación fotosintéticamente activa (*PAR*) está entre los 2 000 a 50 000 Å. (Fuente: modificado de Escaso et al., 2010; PROAIN, 2020^a).

Influencia de la radiación ultravioleta-B en el ADN de las plantas

Después de varios intentos, el 10 de octubre de 1946, cuando el cohete alcanzó una altura de 173 kilómetros, fue posible observar el primer espectro ultravioleta (UV) del Sol, en el rango de 210-300 nm (Vázquez y Hanslmeier, 2006). Según, datos históricos, C.G. Abbot y sus colegas en 1922 demostraron que la radiación del Sol, varía y que esta es más pronunciada en el extremo violeta del espectro; variación, debido al cambio, de temperatura, variable transmisión (emisividad), por la envoltura solar exterior, efecto directo, sobre el UV. Por

su parte, G.M.B. Dobson en 1923 en Inglaterra utilizó un método fotográfico, para medir la RS ultravioleta, transmitida por películas de plata (Ag) durante 34 días en 1922, donde, encontró variaciones de hasta el 500 % y un rango diario estándar del 30 % fuera de la atmósfera (Pettit, 1927; Pettit, 1932). La radiación UV, es aquella radiación, cuya longitud de onda, oscila entre 100-400 nm, posee una insuficiente acción térmica y fotosintética. La fracción, de menor longitud de onda es la UV-B de (280-320 nm), mientras que la fracción radiativa UV-A es de (320-400 nm). En algunos casos dentro del UV-B se incluye la UV-C con (100-280 nm) con poder germicida. En niveles altitudinales elevados, es mayor la proporción de UV-B, lo que induce, un menor crecimiento de los entrenudos, de las plantas (Benavides, 2010; PROAIN, 2020b).

La luz, regula el crecimiento y desarrollo de las plantas, sin embargo, el incremento de la radiación ultravioleta-B, por la acción antropogénica, impacta de forma negativa, la cual, se refleja, en la disminución de la fotosíntesis y producción de la biomasa; también, está radiación, podría causar daño, en distintas biomoléculas como el ADN (Carrasco-Ríos, 2009). El ADN es sensitivo, a la radiación UV-B, debido a que los fotones UV promueven transiciones $\pi-\pi^*$ en las bases nitrogenadas, que forman los nucleótidos alterando los enlaces químicos. La fototransformación, producida en el ADN, afecta a las bases timina adyacentes, dando como resultado, estructuras cíclicas llamados, dímeros de pirimidina ciclobutano (CPD) (Carrasco, 2009).

Andrade et al. (1998a), estudió, la variación de la intensidad, de la radiación UV-B de 290-320 nm, que llega, a la superficie terrestre, de alturas y de costa. Aplicó, en cuatro localidades situadas a 5 200 m n.s.m. y en la costa. Se encontró, una variación de aproximadamente 4.8 % por cada 300 m, medida, desde el nivel del mar; dato validado, con otras mediciones. Factores, de radiaciones, por una parte y por otra, la presencia de gases, como en este caso, donde se analizó la influencia del CO₂ en el clima de la Tierra, el efecto invernadero y el rol que jugó en el clima, en el pasado, así como las consecuencias de un posible incremento de la concentración del mismo traería en el futuro (Andrade et al., 1998b), muestran su relevancia y necesidad, de monitorear para la producción de plantas y otros fines.

INFORMACIÓN SOBRE LA FOTOSÍNTESIS

Dentro de los fenómenos cuánticos, en biología tenemos la fluorescencia, entrelazamiento cuántico, tunelamiento, procesamiento y almacenamiento de información cuántica, que se presentan, en la fotosíntesis, almacenamiento de información neuronal, mutaciones de ADN, en aves para la detección de campos magnéticos. Asignaturas, que requieren analizarse, desde el comportamiento cuántico. Por ejemplo, en la fotosíntesis, el efecto túnel, la comunicación entre proteínas por transferencia de energía por resonancia Forster (FRET), consiguientemente, un posible entrelazamiento cuántico. Los efectos cuánticos, están presentes en los sistemas biológicos e influyen la transmisión de señales, respuesta de biomoléculas, proteínas y péptidos; la liberación de radiación electromagnética, en reacciones químicas. La fotosíntesis, describe, que la mecánica cuántica, está presente en los sistemas biológicos, aprovechando la energía. Esto, reproducido artificialmente, en un laboratorio, permitiría terminar con nuestra dependencia, hacia los combustibles fósiles, generando energía limpia, a partir del desarrollo de nuevas celdas solares (Espinoza, 2017).

Descubrimiento de la fotosíntesis

En la naturaleza, se encuentran organismos, que obtienen energía, para la síntesis primaria, de hidratos de carbono (C_n(H₂O)_m), mediante reacciones químicas, organismos autótrofos quimiosintéticos, la luz del Sol, organismos autótrofos fotosintéticos (plantas). Mientras el H₂O y los minerales los obtienen del suelo, las plantas obtienen la energía a partir de la luz solar por la fotosíntesis, proceso biológico de fotoabsorción y fotoasimilación, que sintetiza los hidratos de carbono a partir de CO₂ y H₂O (Escaso et al., 2010). La fotosíntesis, deriva del griego photo (luz) y syn-thesis (formar compuestos), este proceso, usa luz y CO₂. El término, fotosíntesis, significa, literalmente síntesis usando luz. Capacidad, de las plantas de transformar, la energía lumínica en energía química, según: $6\text{CO}_2 + 12\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$ (Quiroz, 2022). La fotosíntesis, inicia con la provisión de H₂O a través de las raíces y la fotólisis del H₂O, donde se rompe, la molécula, por acción de la luz y libera: $\text{O}_2 + \text{H}_2 + e^- e^-$ (Taiz et al., 2017; Quiroz, 2022). La producción de alimento y de O₂, por las plantas, son parte del mismo proceso, porque los alimentos están

constituidos por sustancias complejas y a base de sustancias simples del suelo, H_2O y aire. La luz del Sol, es esencial para la producción de O_2 y la síntesis de los alimentos; la fotosíntesis, fue descubierto por Ingenhousz (Asimov, 1985). El sacerdote suizo Jean Senebier, realizó experimentos, que le condujeron en 1782 a aceptar, la tesis de Ingenhousz, de que la luz, era esencial, para la producción de O_2 y a sostener complementariamente, que se necesitaba CO_2 ; el O_2 no se producía si la planta era privada de todo contacto, con el CO_2 disponible como gas en el aire o disuelto como (bicarbonato) en el H_2O (Asimov, 1985).

La fotosíntesis y su relación con la vida

En este contexto, la biofísica, es una disciplina, que comprende a la física y biología, con el fin de aplicar modelos y principios físicos, para entender fenómenos complejos, en los sistemas biológicos; abarcando lo macroscópico de los ecosistemas, tejidos, células y los niveles nanoscópicos y atómicos, por tanto, la biofísica, descubre, los secretos de la vida (Figura 3); diversificada y mantenida en el ser vivo como es la célula; constituida, por membranas citoplasmática y nuclear, y moléculas, la célula, contiene la herencia

genética en el ADN, la conciencia en las redes neuronales y la respuesta a la existencia humana (Espinoza, 2017). La mecánica cuántica, describe, el comportamiento de la materia y la luz a escala atómica. Asimismo, surge, como ciencia la biología cuántica; esta extrapolación de la física a nivel cuántico tiene su primer voto, en el fenómeno de la fotosíntesis (Espinoza, 2017). Por tanto, la fotosíntesis inicia con un proceso mecánico cuántico, de absorción de la radiación electromagnética, por parte de las hojas de las plantas; desde, hace millones de años de evolución las plantas aprovechan esta radiación en algunas longitudes de onda, para realizar procesos químicos y la generación de moléculas y orgánulos complejos; conlleva, además, otros fenómenos mecánico cuánticos, entre los cuales se tienen el efecto túnel y el entrelazamiento cuántico (Holman, 1999; Espinoza, 2017). Este fenómeno, considera, que partículas entrelazadas cuánticamente, no son partículas individuales, sino son un sistema, que se comunican a velocidades mayores a la luz y comparten información, de modo, que, dos partículas entrelazadas cuánticamente, saben lo que ocurre entre ellas; considerando, que este fenómeno, está presente en el proceso de la fotosíntesis (Espinoza, 2017).

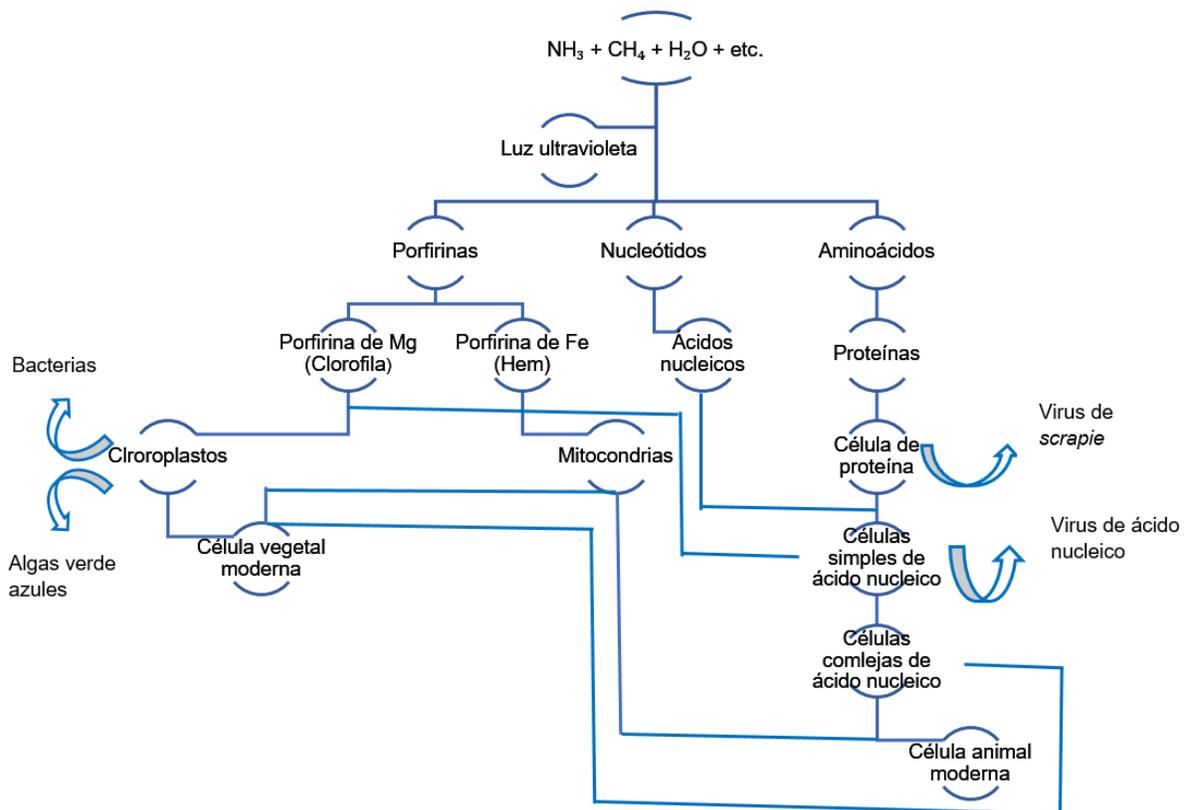


Figura 3. El origen de la vida (Fuente: Asimov, 1985; Rivera et al., 2015).

La vida, en la Tierra, depende de la energía del Sol. La fotosíntesis, es el principal proceso biológicamente relevante, que aprovecha esa energía. Una fracción, de los recursos energéticos, del planeta provienen de la actividad fotosintética (combustibles fósiles). Los organismos fotosintéticos utilizan la energía solar para sintetizar compuestos complejos de carbono (C). Específicamente, la energía de la luz, que induce, la síntesis de carbohidratos y la liberación de O₂, CO₂ y el H₂O. La energía almacenada en estas moléculas, se usa, para promover, procesos celulares en la planta y servir, como fuente de energía para todas las formas de vida (Figura 3). Es fundamental, analizar el rol de la luz, en la fotosíntesis, la estructura, del aparato fotosintético y los procesos, que comienzan con la excitación de la clorofila, por la luz y finaliza, con la síntesis de adenosín trifosfato (ATP) y nicotiamida-adenina dinucleotido fosfato (NADPH) (Taiz et al.,



La respiración, es el proceso fisiológico, mediante el cual las plantas, transforman la molécula de glucosa sintetizada en la fotosíntesis, en CO₂, H₂O y ATP. La respiración, es una forma para las plantas de proveerse, de energía, para desarrollar, sus procesos vitales, como crecimiento, desarrollo para producir más y mejores cosechas (Esquivel, 2022). El físico holandés Jan Ingenhousz en 1779, realizó, varios experimentos, sobre la función restauradora de las plantas, en la que descubrió que las plantas, sólo producían O₂ en presencia de la luz del Sol y nunca de noche (Asimov, 1985). En 1804 otro erudito suizo Nicolás Theodore de Saussure, repitió todo el experimento de Van Helmont, observando al CO₂, en vez del suelo; allá midió el CO₂ que consumía la planta y el aumento de peso del tejido vegetal; sin embargo,

2017; Gonzales, 2022).

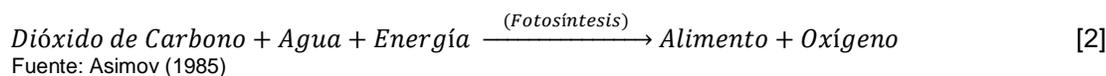
Rol del oxígeno

Un determinado cultivo, para producir, más y mejores cosechas, requiere, energía y para obtener, esta energía, las plantas deben realizar dos procesos fisiológicos, siendo estos, la fotosíntesis y la respiración (Esquivel, 2022). En este contexto, la oxidación, en el cuerpo (respiración), ocurre con lentitud, al igual que la producción de energía. Sin embargo, origina, calor en los animales y en algunos seres, como también una luz débil. La energía, producida en la oxidación, es almacenada, por el cuerpo y facilita todos los procesos consumidores de energía, por ejemplo, el movimiento, que asociamos con la vida (Figura 3); resumido tenemos en la siguiente Ecuación 1:

este aumento de peso, era considerablemente mayor que el CO₂ consumido y Saussure, indico que el único productor posible, de la diferencia de peso, era el H₂O (Asimov, 1985).

Proceso de la fotosíntesis

A partir, del C, H₂ y O₂, después de haber descrito, la respiración y ahora la fotosíntesis; empezamos con el CO₂ y H₂O, y concluimos, con el tejido vegetal (célula vegetal moderna) (Figura 3) y O₂; donde, el tejido vegetal imperioso, es denominado alimento; conociendo, que la luz del Sol, es esencial y ésta en forma, de energía, que, añadido como energía, tenemos la Ecuación 2:

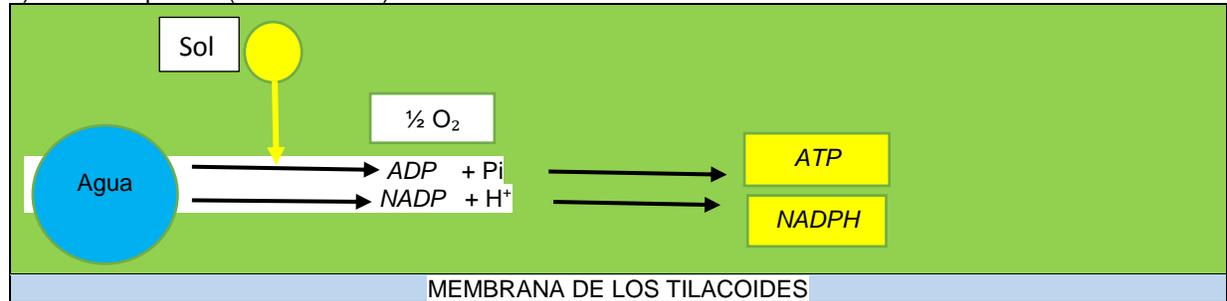


La fotosíntesis, es un proceso complejo, en la que ocurren, varias reacciones bioquímicas, que requieren 2879 kJ mol⁻¹, cuya reacción se muestra en la siguiente Ecuación 3:



El termino $h\nu$, representa, a la energía luminosa transformada en ATP y NADPH (Azcón-Bieto y Talón, 2008). Según, Esquivel (2022), la fotosíntesis es el proceso fisiológico, mediante, el cual las plantas transforman, la energía solar o luminosa, llamada fotón, en energía química llamada glucosa; y tiene dos fases (Figura 4):

a) Fase fotoquímica (fase luminosa):



b) Fase biosintética (fase oscura)

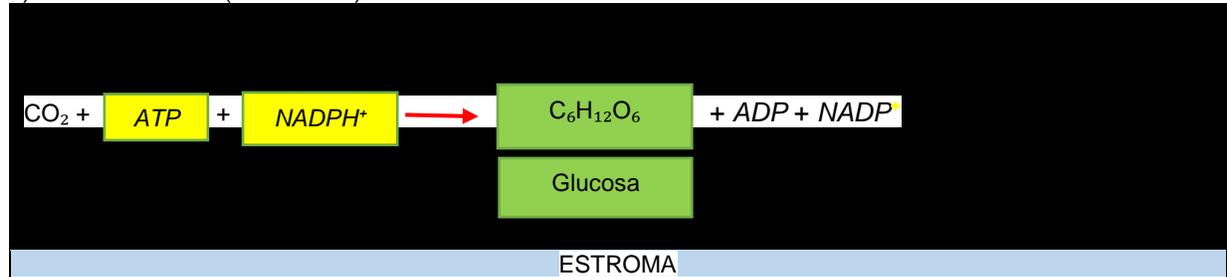


Figura 4. Fases de la fotosíntesis (Esquivel, 2022).

a) Fase fotoquímica (Fase luminosa)

En esta fase según la Figura 4, las plantas utilizan la energía luminosa (fotón), cuya energía es captada por la clorofila, por lo cual, las plantas deben contar con elementos nutricionales disponibles, para que sintetizen cantidades relevantes de clorofila y, por consiguiente, capturar la mayor cantidad de energía luminosa (Barbante, 2019; Esquivel, 2022; Quiroz, 2022). Las plantas captan energía luminosa, por medio de los dos fotosistemas. En el fotosistema (FSII), las plantas captan, la energía luminosa mediante la clorofila, a través del pigmento P680, denominado, así porque, la clorofila absorbe longitudes de onda inferiores o iguales 680 nm; esta energía luminosa, será utilizada para romper la molécula de H₂O en dos moléculas de H⁺, dos electrones y una molécula de oxígeno, según: $H_2O \rightarrow 2H^+ + 2e^- + \frac{1}{2}O_2$.

La molécula de O₂, es liberada a la atmosfera, y los H₂ son utilizados en el fotosistema (FSI); los dos electrones libres, se combinan, con el lípido, llamado plastoquinona (C₅₅H₈₀O₂) y luego, estos entregan a la cadena, de electrones, de la proteína, de nombre citocromo, en la que se forma la energía química ATP. Simultáneamente, dentro el FSI, la luz es absorbida por dos moléculas de clorofila a P700. En forma independiente al FSII, que libera dos electrones aceptados por la ferredoxina (proteína soluble que contienen grupos de Fe y S con bajos potenciales redox), de donde son enviados para reducir NADP a NADPH, los otros dos electrones, transportan

electrones para la fosforilación del adenosín difosfato (ADP) más fosfato inorgánico (Pi), para formar ATP, ambas energías son fuente de energía durante el ciclo de Calvin y Benson (Figura 5), que, forma la glucosa. Cuyos sistemas, absorben, energía luminosa libre. También, denominada, fase oscura (Franco y Castillo, 2013; Esquivel, 2022).

b) Fase biosintética (Fase oscura)

Comienza con la captura del CO₂ de la atmósfera, por la ribulosa (1.5 difosfato) y la enzima ribulosa-1.5-bisfosfato carboxilasa/oxigenasa (RuBisCO), y origina un compuesto de C₆, que se descompone en dos moléculas de ácido 3-fosfoglicérico (PGA). Son moléculas, formadas por C₃, donde las plantas que se rigen, en esta vía metabólica llamada C3 (bacterias y algas). Varias especies vegetales tropicales de ecosistemas desérticos, cambian el ciclo en la que, el primer producto fotosintético, es de cuatro moléculas (un ácido dicarboxílico) de C y no de tres moléculas; siendo, un método alternativo, llamado vía de C4 (ruta de Hatch-Slack), al igual, que en plantas similares. Posteriormente, se produce la reducción del CO₂ fijado, a través del consumo de ATP y NADPH, obtenidos, en la fase luminosa; el ácido 3-fosfoglicérico se reduce a gliceraldehído 3-fosfato (PGAL), que, continua, en varias rutas. La primera vía, regenera la ribulosa 1-5-difosfato. También, se dan otras rutas posibles, como la biosíntesis de los aminoácidos, ácidos grasos, glucosa, fructosa y almidón. La regeneración, de la ribulosa-1.5-difosfato, ocurre a partir del gliceraldehído 3-fosfato, a

través de un proceso, en la, que, se forman compuestos de C_4 , C_5 y C_7 , parecidos, al ciclo de las pentosas fosfato, en dirección inversa, en el ciclo de Calvin, por cada molécula de CO_2 , que, se incluye, requiere dos de $NADPH$ y tres de ATP . Las plantas C_4 , en relación con la C_3 , tienen una tasa fotosintética elevada, en lugares, de altas temperaturas e intensa luz, además, no requieren, que sus estomas estén abiertas constantemente, lo cual optimiza el consumo de H_2O (ARDEEA, 2019; Esquivel, 2022; Quiroz, 2022).

En el ciclo de Calvin según la **Figura 5**, se transforman, moléculas inorgánicas de CO_2 , en moléculas orgánicas sencillas como el PGA , $PGAL$, las cuales dan origen al resto de los compuestos bioquímicos que conforman las plantas, como los aminoácidos, ácidos grasos, glucosa, fructosa y almidón. Las plantas demandan, más energía, en forma de ATP , para crecer, formar raíces, florecer y fructificar y, por tanto, esta energía obtienen mediante la respiración (Esquivel, 2022; Quiroz, 2022).

La respiración, consiste en el proceso fisiológico, mediante el cual las plantas, transforman, la molécula de glucosa sintetizada, en la fotosíntesis, en CO_2 , H_2O y ATP . Las plantas a través de la respiración se proveen de energía, para el desarrollo, de sus procesos vitales, como el crecimiento, producir e incrementar las cosechas (Esquivel, 2022; Quiroz, 2022).

Las fases, de la respiración son: a) glucólisis o glicólisis b) ciclo de Krebs c) transporte de electrones. La glucólisis o glicólisis, es la primera etapa, de la respiración, que, consta de complejas reacciones, que se realizan en el citosol de la célula, la glucosa, se descompone en dos moléculas de ácido pirúvico, con la finalidad, de proveerse de energía, para la célula. Comprende nueve etapas enzimáticas secuenciales, que, transforman la glucosa, en dos moléculas de piruvato, la cual sigue otras vías metabólicas y de esa manera, continuar, entregando energía a la planta. Estas etapas son: 1) fosforilación de la glucosa; 2) isomerización de la fructosa; 3) fosforilación de la fructosa; 4) ruptura de la fructosa; 5) oxidación y formación de enlace fosfato de alta energía; 6) generación de ATP ; 7) y 8) reordenamiento molecular; y 9) generación de ATP (Paniagua et al., 2007; Esquivel, 2022).

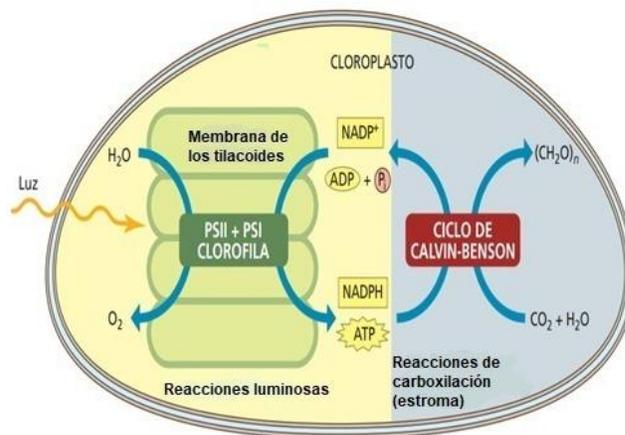


Figura 5. Reacciones luminosas de carboxilación de la fotosíntesis, en cloroplastos, de las plantas terrestres. En las membranas, de los tilacoides, la excitación, de la clorofila, en el sistema de transporte, de electrones $PSII+PSI$ por la luz, induce, la formación de ATP y $NADPH$. En el estroma, el ATP y la $NADPH$, son consumidos, por el ciclo de Calvin-Benson, en una serie, de reacciones catalizadas, por enzimas, que reducen, el CO_2 atmosférico a carbohidratos, como las triosas fosfato. Fuente: modificado de Taiz et al. (2017).

ANÁLISIS DE LA PRODUCCIÓN PRIMARIA DE HORTALIZAS BAJO INVERNADERO

Van Helmont y Hales, tenían razón, ya que las plantas, se nutren por el H_2O y aire, y se abastecen de las mismas, para formar sus tejidos sin mecanismos que demanden la acción de la luz del Sol y por tanto, no forman, parte de la fotosíntesis. Por otra parte, si se considera la descomposición del alimento en CO_2 y H_2O , esto, toma en cuenta C , H_2 y O_2 . Por tanto, el aire, contribuye a la nutrición de las plantas, con su contenido, en N_2 , CO_2 , en la que, el N_2 , es fundamental, en la fotosíntesis (Asimov, 1985). En este contexto, la RS, factor ambiental, relevante, en la producción de cultivos bajo invernadero, participa, en los procesos de la fotosíntesis, los balances de agua y energía, el crecimiento y desarrollo de los cultivos. Por ende, el manejo de la RS, es fundamental, porque, determina, la relación productiva de materia seca y el rendimiento, con la cantidad de radiación interceptada por el cultivo. Es fuente, de energía, utilizada por las plantas en la fotosíntesis y su eficiencia, de aprovechamiento por las plantas, depende, de la longitud de onda (**Figura 2**) (Raj y Ramírez, 2007; INTAGRI, 2022). Por tanto, la PAR es la que, favorece la fotosíntesis en las plantas; pero, las radiaciones superiores a 700 nm no favorecen; sin embargo, generan la acumulación de calor en el invernadero. A su vez, la PAR , representa el 45-50 %

de la RS global recibida, siendo, ésta la de mayor calidad para las plantas. En los sistemas, de producción bajo invernadero, es necesario, analizar los factores, que pueden modificar, la calidad y cantidad de la RS, que llega a las plantas, así, como los requerimientos, de luz de cada cultivo o variedad (INTAGRI, 2022). Sin embargo, en Sheffield en 1836, Robert Marnock, diseño una gran gama de invernaderos, en la que crecía el nenúfar tropical gigante (Victoria amazónica), por otra parte, el Jardín Botánico Nacional de Gales tiene un rol de conservación, por ejemplo, el invernadero de Sir Norman Foster cultiva plantas de clima mediterráneo raras y en peligro de extinción de todo el mundo. La visionaria Palm House de hierro fundido de Kew fue construida en 1840, con su forma icónica, que posteriormente se convirtió en el invernadero más conocido del mundo (Rutherford, 2015).

La radiación solar en los casos de Europa (Holanda, España) y América (México)

Tabla 1. Radiación solar acumulada.

Meses	Holanda (MJm ⁻² dia ⁻¹)	España (MJm ⁻² dia ⁻¹)	México (MJm ⁻² dia ⁻¹)
Enero	2	9	15
Febrero	7	13	19
Marzo	8	15	21
Abril	15	20	24
Mayo	18	25	24
Junio	20	27	23
Julio	18	27	22
Agosto	16	25	21
Septiembre	13	18	20
Octubre	6	13	19
Noviembre	3	9	16
Diciembre	2	8	16

Radiación muy baja	Radiación limitada	Radiación óptima	Radiación elevada
--------------------	--------------------	------------------	-------------------

Fuente: Según Castellanos en el 2009 (INTAGRI, 2022).

El manejo de la RS, depende de la cantidad y calidad que se presenta en la zona de producción, según se detalla en la [Tabla 1](#) y [Figura 6](#), por Castellanos en el 2009, se muestra, la media diaria de la RS acumulada, en Holanda, España y México; así, como, una clasificación de la radiación, en base a las necesidades, de los cultivos hortícolas en invernadero. En el caso, de México, se presenta mejores condiciones, en cuanto a RS, para un desarrollo óptimo de las plantas, por tanto, no requiere prácticas complementarias que coadyuven a incrementar la cantidad de luz. Para el caso, de España (Almería), la RS acumulada es variable, recomendando que el manejo de la radiación debe estar condicionado a la época del año, de manera específica. En el caso, de Holanda, éste presenta, una radiación baja, que limita, el desarrollo de los cultivos, en un período amplio del año, por lo cual, se debe promover estrategias, que permitan incrementar, la calidad y cantidad de luz al interior del invernadero, evitando que éste sea un factor limitante de la producción (INTAGRI, 2022).

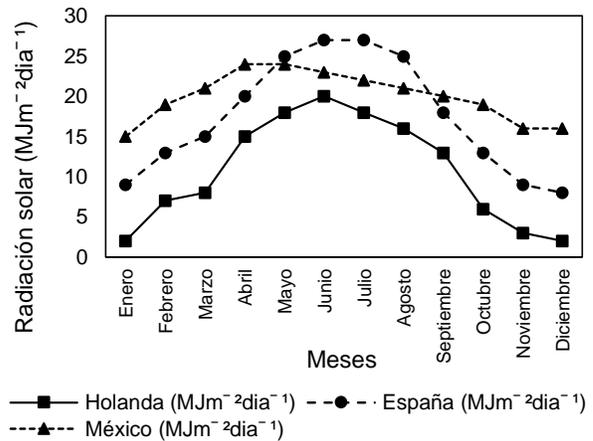


Figura 6. Radiación solar acumulada (media diaria), en el exterior del invernadero en Holanda, España (Almería) y México (Chapala, Jalisco) según Castellanos (2009) (INTAGRI, 2022).

Requerimientos de la radiación solar en cultivos hortícolas

La radiación es una fuente fundamental de energía, que está relacionado con todos los procesos fisiológicos de las plantas; la RS puede medirse según las unidades de la [Tabla 2](#), integrando tiempo. Por ejemplo, una radicación global de 1 vatio por metro cuadrado (W m⁻²), durante un segundo, es igual a 1 Joule por metro cuadrado por segundo (J m⁻²s⁻¹);

entonces, en 1 hora, tendríamos 3 600 J m⁻²s⁻¹. Otro ejemplo, si en una hora tenemos, una radiación global media de 400 W m⁻², éste equivale a 400 J m⁻²s⁻¹ y también a 1 440 000 J m⁻²s⁻¹. Asimismo, un millón de Joules, equivalen, a 1 Mega joule (MJ), entonces equivale a 1.44 MJ m⁻²s⁻¹. Si esa, fuera la radiación media, durante 12 horas del día, entonces la radiación acumulada en todo el día, sería de 17.28 MJ m⁻²s⁻¹. Entonces, la PAR (45-50 %) para fines prácticos, se usa, más comúnmente, la mitad. En la [Tabla 3](#) se

muestran, los requerimientos de radiación, en tres cultivos hortícolas, bajo invernadero (Pérez y Gregorio, 2002; INTAGRI, 2022).

Tabla 2. Equivalencias de unidades de Radiación Global, PAR y la Luz visible.

Radiación Global	PAR	PAR	Luz visible
Wm^{-2}	$\mu molm^{-2}s^{-1}$	$Wm^{-2}s^{-1}$	Lux
$Jm^{-2}s^{-1}$	$\mu Em^{-2}s^{-1}$	$Jm^{-2}s^{-1}$	
1	2	0.5	100

Fuente: Según Lorenzo en 2006 (Pérez y Gregorio, 2002; Benavides, 2010; INTAGRI, 2022).

Tabla 3. Requerimiento mínimo de radiación por día para evitar pérdidas de rendimiento.

Cultivo	Dentro del invernadero (MJm ⁻² día ⁻¹)	Fuera del invernadero (MJm ⁻² día ⁻¹)
Tomate (<i>Lycopersicon esculentum</i> Mill L.)	10	14
Pepino (<i>Cucumis sativus</i> L.)	12	17
Pimiento (<i>Capsicum annuum</i> L.)	9	13

Fuente: Según Pilar Lorenzo del IFAPA (Investigación y Formación Agraria, Pesquera, Alimentaria) de España (Pérez y Gregorio, 2002; Bargel y Neinhuis, 2005; Escobar y Lee, 2009; INTANGRI, 2022).

En la actualidad, existen diversos diseños de invernaderos, respecto a la RS, con cubiertas de plástico, mallas-sombra y pantallas de telas, la cual regula la calidad y cantidad de energía luminosa, en los invernaderos; preferentemente, deben ser transparentes a las radiaciones luminosas, para dar paso a la luz visible; éstos materiales reflejan una fracción de la luz, que va de 20-30 %, por lo general. Sin embargo, es necesario, evitar sombras en lo posible. Hay materiales que generan luz difusa, no emiten sombras y llegan a todo el ambiente. La cantidad de luz, disponible al interior de los invernaderos, depende, fundamentalmente, de su orientación y diseño de la estructura; pero, principalmente, del ángulo de la cubierta, con respecto al Sol; se recomienda, que los materiales de la cubierta, de los invernaderos, transmitan la luz solar incidente de 85-90 % (SH, 2017; INTAGRI, 2022). Por otra parte, los desórdenes fisiológicos (enfermedades abióticas), son un conjunto, de anomalías, de las plantas, causadas por condiciones climáticas adversas, de baja o alta RS junto a otros factores. En el tomate, asociados a la RS, son las grietas en frutos, maduración manchada (payaseado), hoja enrollada, frutos huecos y golpe de Sol (INTAGRI, 2022).

Según Torres (2017), la luminosidad, en el cultivo de tomate, coadyuva, al crecimiento vegetativo, de la planta, que requiere 6 horas (h) diarias de luz directa,

para florecer, menor a este, pueden incidir en la fecundación. En Arica, por ejemplo, en zonas de alto polvo en suspensión, durante períodos de recambio de cultivo, se lavan las cubiertas de los invernaderos, con el objetivo, de mejorar la producción y evitar un posterior exceso de crecimiento vegetativo. Otros casos, indican que el fotoperiodo, no es un factor crítico, en relación a la intensidad de radiación, que sí, es muy alta, podrían producir golpes de Sol, partiduras y coloración irregular. El día largo, no incide en la floración del tomate (es de día neutro); requiere un nivel de luminosidad mínimo, durante el primer racimo floral; pero, en ambientes de baja luminosidad, reducen, su número de flores. Para Jasso et al. (2012), valores reducidos de luminosidad, pueden afectar los procesos de floración y fecundación, y consiguientemente el desarrollo vegetativo, pero, en el ciclo vegetativo, resulta fundamental, la interrelación, entre, la temperatura diurna, nocturna y la luminosidad. Pero, es insensible, al fotoperiodo entre 8-16 h, requiere iluminación, caso contrario reduce la fotosíntesis neta e implican, competencia por productos asimilados, incidiendo, en el desarrollo y producción. Para la floración y cuajado, demanda valores, de radiación total diaria alrededor de 0.85 MJ m⁻², como umbral mínimo, preferentemente, mayor iluminación en menor tiempo, que iluminaciones bajas durante un mayor tiempo. En el caso de Bolivia, en el altiplano, como referencia, la producción de hortalizas bajo invernadero, se viene implementado, desde 1980, actualmente existe una cantidad importante de productores y otros que no cuentan, quienes, son los que muestran un interés relevante, de contar con este tipo de infraestructura agroproductiva (Pérez, 2020).

Biomasa

Una planta, es una estructura, que soporta órganos especializados; compuesta de madera, con órganos especializados, como las hojas, que realizan la fotosíntesis y las raíces que absorben H₂O y nutrientes transportados por la savia. Los frutos facilitan la reproducción sexual. La energía de las plantas se almacena en las raíces, tubérculos, savia y frutas. Las partes, de la planta, también representan, una acumulación de energía, en la que el tejido vegetal está compuesto de 50-95 % de H₂O. Las hojas contienen proteínas y minerales. Cuando, existe un buen manejo, se devuelven las hojas al suelo, como mantillo y fertilizante. Las hojas, pueden transformarse en biogás de CH₄ y CO₂ por digestión anaerobia, generando, residuos de lodo (abono orgánico), con capacidad de retención de minerales, consumidos por la planta. La

madera, contiene minerales, como las cenizas en 1 % de la masa seca. La madera está compuesta por celulosa (50 %), hemicelulosa (30 %) y lignina (20 %). La celulosa polihexosa, hemicelulosa, y polipentosa, son carbohidratos. La lignina, contiene fenol resistente a microorganismos (Vieira y Ordoñez, 2021). Asimismo, se ha reportado, que, en plantas, que, crecen con baja iluminación, existe mayor asimilación de CO₂ por unidad de biomasa foliar, las que se reducen, cuando se considera el área foliar (Fernández y Tapias, 2004).

Referencias del cambio climático en Sudamérica y Bolivia

Para América Latina, se pronostica un aumento del nivel del mar, en 3.6 mm anuales, en relación al promedio global de 3.3 mm, que afectaría al 27 % de la población costera. Previsto, además, una sequía que provocaría una escasez de alimentos. Impacto negativo, relacionado, con la pobreza del área rural. Se estima que al año 2025, la capacidad de reducir, la pobreza rural, será debilitada, por efectos del cambio climático. Este continente, posee el 31 % de reserva de H₂O dulce del mundo. Una importante cantidad de países, hoy experimentan, un permanente estrés hídrico. En el 2019, Chile y México han consumido el 60 % de sus reservas de H₂O, por su parte, Perú y Venezuela el 40 %, y Bolivia y Argentina el 20 %. Actualmente, 40 millones de personas carecen de acceso al H₂O potable, siendo un reto a corto plazo (Sahd et al., 2022). Sin embargo, las mediciones climatológicas de la RS, se pueden usar, para estimar, las eficiencias de la fotosíntesis y el crecimiento de los cultivos (Szeicz, 2015) de campos agrícolas y praderas. Un exceso de CO₂, en la atmósfera, se debe, posiblemente al cambio climático, sin embargo, este sustrato determina la tasa de la fotosíntesis (Azcón-Bieto y Talón, 2008).

Bolivia, se halla entre los 9 y 23°S de latitud y 70 y 57°O de longitud. La altitud, condiciona la modelación, a través del uso de PRECIS (Predicting Regional Climates for impact Studies) del Hadley Centre de Reino Unido aplicado en Bolivia, respecto a la validación de datos climáticos de temperatura (media, máxima, mínima), precipitación pluvial, afirman, que, inciden las diferencias entre el llano y las alturas, las nubes y precipitación de las zonas de los valles y la andina; su clima es influido, por su ubicación geográfica, orografía y geomorfología (Andrade y Blacutt, 2010). Según Andrade (2008), el planeta ha incrementado, su temperatura media, en los últimos 30

años. Por su parte, el panel internacional de cambio climático (IPCC), afirma, que el incremento, se debe a los gases de efecto invernadero, con una probabilidad del 90 %. Aspecto que sugiere generar información temporal y espacial completo, complementado, con políticas, de gestión institucional a nivel nacional. Evidencias, como que se produce quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) en los lugares donde normalmente no se producía, y reportes, de deshielo en los nevados del altiplano e inundaciones en el oriente, más el análisis de los fenómenos de la niña y el niño, hacen complejo lo certero. También, son parte, del calentamiento global, el agujero y capa de ozono (O₃), la intensidad de la radiación UV, la contaminación atmosférica urbana, los chaqueos. En Bolivia, no es posible, precisar el cambio climático, debido a la topografía y a la falta de registros precisos de información climática. Se prevé, que en el 2036 el bosque húmedo subtropical, se reducirá en 71.52 %. Sin embargo, en la Figura 7 se muestra, la variación de la temperatura en función de los años.

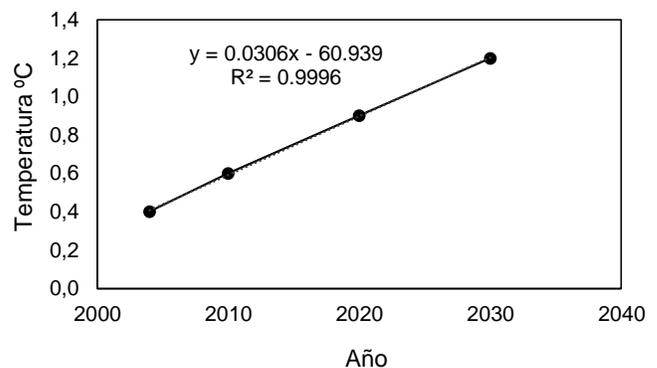


Figura 7. Proyección del incremento de temperatura en Bolivia (Andrade, 2008); donde R², que es el coeficiente de determinación reporta un valor próximo a 1 y la recta es óptima (Johnson, 2012).

Durante, la medición de agosto de 2010 a julio de 2012, la estimación de la RS, en el altiplano boliviano, se han validado, los modelos Bristow Campbell (BC) y Hargreaves-Samani con resultados positivos para ambos (Torrez et al., 2013), por una parte y por otra, se ha evaluado los valores extremos de temperatura en Bolivia, por su importancia, de impactos en la agricultura, previsiones energéticas, mortalidad; vinculados, al cambio climático, indica, que, los extremos, ocurren en cada lugar de estudio, en relación a la estacionalidad del país (Peñañiel y Andrade 2014). Asimismo, por ejemplo, en el noreste de Cochabamba, se registró, una radiación global media anual de 4.2-4.5 kWh m⁻² región, de baja altitud, con clima tropical y alta humedad, con mayor dispersión de RS;

en relación, al suroeste, que comprende, la Cordillera Oriental Central, que reporto de 5.7-6.3 kWh m⁻² al día, con un clima seco (Lucano y Fuentes 2010). En otro estudio, por ejemplo, los sensores ubicados a tres metros sobre el nivel del suelo, reportaron datos promedios de la energía eólica, en periodos estacionales, mensuales y diarios; que, consideraron parámetros, como variaciones de la densidad del aire e intensidad de la turbulencia. Los resultados obtenidos, mostraron una correlación interesante, entre la disponibilidad y la demanda local de energía; estadísticamente; además, se cuenta, con un potencial eólico unidireccional y una media de 3 448 m s⁻¹ (Encinas et al., 2015).

CONCLUSIONES

La radiación solar, es fundamental para la vida de los organismos y en este caso, para la producción de plantas hortícolas. Por tanto, es importante, considerar datos de la radiación solar y el clima en general, para el manejo agronómico, innovación tecnológica, para producir vegetales bajo invernadero, porque es fundamental, para el proceso de la fotosíntesis, que está condicionado a la ubicación geográfica de los sistemas agroproductivos. Se ha evidenciado, la existencia de variaciones, respecto a la radicación solar y el aprovechamiento, de este recurso natural, determinante, para las hortalizas, que son demandadas, a diario por la humanidad. Asimismo, se ha logrado establecer, la importancia, de la relación del dióxido de carbono, oxígeno, agua, tasa de la fotosíntesis y el efecto invernadero, en relación al consumo, de minerales disponibles del suelo, por parte de las plantas, para producir alimentos. La radiación solar, debe ser aprovechada, en al área rural, para generar energía, para bombeo de agua de riego, y otros servicios en predios familiares.

BIBLIOGRAFÍA

- Andrade, M. 2008. Mitos y verdades acerca del cambio climático en Bolivia (en línea). Revista de física. (14):42-49. Consultado 11 nov. 2021. Disponible en http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1562-38232008000100003&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Andrade, M; Forno, R; Palenque, ER; Zaratti, F. 1998a. Estudio preliminar de la altura sobre la radiación solar ultravioleta B. Revista Boliviana de Física 4(4):14-17.
- Andrade, M. et al. 1998b. El dióxido de Carbono: su influencia pasada y futura. Revista Boliviana de Física 4(4): 23-31.
- Andrade, M.F., Blacutt, L.A. 2010. Evaluación del modelo climático regional PRECIS para el área de Bolivia: Comparando con datos de superficie. Revista Boliviana

- de Física (16):1-112.
- ARDEEA (Agricultureros Red de Especialistas en Agricultura). 2019. C3. C4. CAM. ¿Sabes qué significa? (en línea). Agricultureros. 1-1. Consultado 10 ene. 2022. Disponible en <https://agricultureros.com/c3-c4-cam-sabes-que-significa/#:~:text=>
- Asimov, I. 1985. Fotosíntesis. Madrid, España. Ediciones Orbis S. A. (ed). 122 p. ISBN: 84-7634-156-3.
- Azcón-Bieto, J; Talón, M. 2008. Fundamentos de fisiología vegetal. Segunda edición. España. McGraw-Hill Interamericana (ed). 651 p. ISBN: 9788448192938
- Babatunde, EB. 2012. Solar radiation. Rijeka, Croatia. Intenchopen.com (ed). 484 p. ISBN 978-953-51-0384-4
- Babor, JA; Ibarz, AJ. 1949. Química general moderna. Barcelona, España, EDINA SRL. (ed). 901.
- Barbante, KG. 2019. Fisiología vegetal. Tercera edición. Rio de Janeiro, Brasil. Guanabara Koogan (ed). 403 p.
- Bargel, H; Neinhuis, C. 2005. Tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) fruit growth and ripening as related to the biomechanical properties of fruit skin and isolated cuticle (en línea). Journal of Experimental Botany, 56(413):1049–1060. Consultado 16 dic. 2021. Disponible en <https://doi.org/10.1093/jxb/eri098>
- Benavides, BHO. 2010. Información técnica sobre radiación ultravioleta, el índice y su pronóstico (en línea). IDEAM-METO/001-2010 (ed). 39 p. Consultado 10 ene. 2022. Disponible en <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022454/NotatecnicaUVPaginaWEBfinal.pdf>
- Carrasco-Ríos, L. 2009. Efecto de la radiación ultravioleta-B en plantas (en línea). IDESIA. 27(3):59-76. Consultado 15 nov. 2021. Disponible en <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292009000300009>
- Cetto, A.M. 1987. La luz en la naturaleza y en el laboratorio (en línea). Primera edición. México. Fondo de cultura económica S.A. de C.V. 104 p. ISBN 968-16-2565-X. Consultado 11 ene. 2022. Disponible en <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/menu.htm>
- Chang, R; Goldsby, KA. 2013. Química. Undécima edición. China. Mc Graw Hill (ed). 1172 p. ISBN: 978-607-15-0928-4.
- Curt, MD; Martin, I; Manzanarez, P. 1991. La producción vegetal en relación a la radiación solar (en línea). Agricultura moderna. (705):344-350. Consultado 14 ene. 2022. Disponible en <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=648>
- Doran, S; Gallagher, J. 2022. Salutación (en línea). 1 hora, 0 min, son. Color. Consultado 19 ene. 2022. Disponible en <https://www.youtube.com/watch?v=FI0oVK4Pa44>
- Encinas, J; Torrez, R; Ghezzi, F; Palenque, ER. 2015. Características del viento y del potencial eólico del altiplano central (en línea). Revista Boliviana de Física 27(27):20-24. Consultado 19 ene. 2022. Disponible en http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1562-38232015000200004
- Escaso, SF; Martínez, GJL; Planello, CMDR. 2010. Fundamentos básicos de fisiología vegetal y animal.

- Madrid, España. UNED Pearson (ed). 264 p. ISBN: 978-84-832-2735-0.
- Escobar, H; Lee, R. (Ed). 2009. Manual de producción de tomate bajo invernadero (en línea). Segunda edición. Bogotá. Colombia. 180 p. ISBN 978-958-725-025-1. Consultado 22 ene. 2022. Disponible en https://www.utadeo.edu.co/sites/tadeo/files/node/wysiwyg/pub_29_-_manual_produccion_de_tomate.pdf
- Espinoza Alcaide, GA. 2017. Mecánica cuántica en biología: caso Fotosíntesis. Tesis Lic. Sonora, México. Universidad de Sonora. 84 p.
- Esquivel, MG. 2022. Fotosíntesis y respiración (en línea). DROKASA 1-13. Consultado 13 ene. 2022. Disponible en http://drokasa.pe/aplicacion/webroot/imgs/notas/Fotosin_tesis_y_Respiracion.pdf
- Fernández, M; Tapias, MR. 2004. Influencia de la intensidad luminosa sobre la tasa fotosintética de plantas de una savia de pinos españoles. Cuad. Soc. Esp. Cienc. For. (20):73-78.
- Franco, BD; Castillo, BSE. 2013. Ferredoxinas (en línea). Educ. qui. 24(4): 426-430. Consultado 15 nov. 2021. Disponible en http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-893X2013000400010
- Gonzales, ZV. 2022. Importancia de la radiación solar como fuente de energía (en línea). CITE Energía. 1-7. Consultado 15 ene. 2022. Disponible en http://www.citeenergia.com.pe/wp-content/uploads/2021/01/Ing.-Victor-Gonzales-Zamora_2.pdf
- Holman, JP. 1999. Transferencia de calor. Octava edición (Primera en español). Mc Graw Hill (ed). Madrid, España. 484 p. ISBN: 84-481-2040-X
- IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). 2022. Características de la radiación solar (en línea). 1-16. Consultado 22 ene. 2022. Disponible en <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/caracteristicas-de-la-radiacion-solar>
- IICA (Instituto Interamericano De Cooperación para la Agricultura). 2006. Gestión de agronegocios en empresas asociativas rurales. Lima, Perú. IICA-PRODAR, FAO (ed). 46 p. ISBN 92-90-39-697-0.
- INFOCLIMA (Información del clima). 2022. Radiación solar (en línea). 5 min. 46 seg son. Color. Consultado 20 ene. 2022. Disponible en <https://www.youtube.com/watch?v=TBEo5z9Zeyk>
- INTAGRI SC. (Instituto para la innovación tecnológica en la agricultura). 2022. Importancia de la radiación solar en la producción bajo invernadero (en línea). INTAGRI. 1-5. Consultado 05 ene. 2022. Disponible en <https://www.intagri.com/articulos/horticultura-prottegida/importancia-de-la-radiacion-solar-en-la-produccion-bajo-invernadero>
- Iqbal, M. 1983. An introduction to solar radiation. Columbia, Canada. Academic press (ed). p. ISBN 0-12-373750-8
- Jasso, CC; Martinez, GMA; Chavez, VJR; Ramirez, TJA; Garza, UE. 2012. Guía para cultivar Jitomate en condiciones de malla sombra en San Luis Potosí (en línea). 54 p. ISBN 978-607-425-821-9. Consultado 13 oct. 2021. Disponible en <http://www.inifapcirne.gob.mx/Biblioteca/Publicaciones/905.pdf>
- Johnson, RA. 2012. Probabilidad y estadística para ingenieros. Octava edición. México. Pearson (ed). 541 P. ISBN 978-607-32-0799-7.
- Lovegrove, K; Stein, W. 2012. Concentrating solar power technology: Principles, developments and applications. Cambridge, UK. WP (ed). 674 p. ISBN 978-1-84569-769-3.
- Lucano, MJ; Fuentes, MIE. 2010. Evaluación del potencial de radiación solar global en el departamento de Cochabamba utilizando modelos de sistemas de información geográfica e imágenes satelitales (en línea). Revista Boliviana de Física. 17(17):1-10. Consultado 19 sept. 2021. Disponible en http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1562-38232010000100002
- MA (Meteorología Aeronáutica). 2022. Radiación solar y radiación terrestre (en línea). 14 min. 28 seg. Son. color. Consultado 18 ene. 2022. Disponible <https://www.youtube.com/watch?v=r03BhPmiySA>
- Martínez, M. 2016. Radiación solar – conceptos y aplicaciones. Informativo INIA-URURI. (109):1-4.
- NASA (The National Aeronautics and Space Administration). 2020. Imágenes del sol hechas por la NASA muestran sus cambios durante diez años (en línea). 3 min. 59 seg. Son. Color. Consultado en 17 ene 2022. Disponible en <https://www.youtube.com/watch?v=7RCXokFyDQ>
- NASA (The National Aeronautics and Space Administration). 2022. La NASA capta imagen completa más nítida del planeta Tierra (en línea). 0 min. 20 seg. Son. Color. Consultado 18 ene 2022. Disponible en https://www.youtube.com/watch?v=bzek8_2AB08
- Paniagua, R; Nistal, M; Sesma, P; Álvarez-Uría, M; Fraile, B; Anadón, R; Sáez, FJ. 2007. Citología e histología vegetal y animal. Cuarta edición. Vol. II. Mc Graw Hill (ed). Madrid, España. 939 p. ISBN: 978-84-481-5593-3.
- Peñañiel, VM; Andrade, M. 2014. Análisis estadístico de temperaturas extremas sobre territorio boliviano (en línea). Revista Boliviana de Física. (25):1-6. Consultado 21 oct. 2021. Disponible en http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1562-38232014000200001
- Pérez, R; Gregorio, D. 2002. Sistema Internacional de Unidades SI (en línea). Gac. Med. Caracas. 110(4):1-15. Consultado 22 ene. 2022. Disponible en http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0367-47622002000400011
- Pérez, V. 2020. Producción de hortalizas en invernaderos aporta a la autogestión alimentaria en comunidades del Altiplano paceño (en línea). CIPCA. 1-1. Consultado 31 ene. 2022. Disponible en <https://cipca.org.bo/noticias/produccion-de-hortalizas-en-invernaderos-aporta-a-la-autogestion-alimentaria-en-comunidades-del-altiplano-paceno>

- Petela, R. 2010, Engineering thermodynamics of thermal radiation for sola power utilization. United States. Mc Graw Hill (ed). 399 p. ISBN: 978-0-07-163963-7.
- Pettit, E. 1927. Ultra-Violet Solar Radiation. Proc. N.A.S. 13(1):380-387.
- Pettit, E. 1932. Measurements of ultra-violet solar radiation. ApJ. 185-221.
- PROAIN (Tecnología Agrícola). 2020a. La radiación solar en cultivos bajo invernaderos (en línea). Proain Tecnología Agrícola. 1-3. Consultado 14 ene. 2022. Disponible en <https://proain.com/blogs/notas-tecnicas/la-radiacion-solar-en-cultivos-bajo-invernaderos>
- PROAIN (Tecnología Agrícola). 2020b. Importancia de la radiación solar en la producción de plántulas (en línea). Proain Tecnología Agrícola. 1-4. Consultado 24 ene. 2022. Disponible en <https://proain.com/blogs/notas-tecnicas/importancia-de-la-radiacion-solar-en-la-produccion-de-plantulas>
- Quiroz, O. 2022. Fotosíntesis (en línea, video). Ministerio de Educación Pública. 8 min 36 seg. Son. Color. Consultado 19 ene. 2022. Disponible en <https://www.youtube.com/watch?v=vBGGVU2DIDo>
- Raj, GM; Ramírez, BVH. 2007. Elementos de agroclimatología. UNISARC (ed). 308 p. Risaralda, Colombia. http://ece.uprm.edu/~m_goyal/agroclimatologia.pdf
- Rapp, D. 2014. Assessing climate change Temperatures, Solar Radiation and Heat Balance. Third Edition. London, United Kingdom. Springer (ed). ISBN 978-3-319-00454-9.
- Resnick, R; Halliday, D; Krane, KS. 2001. Física Vol. 1. Cuarta edición. México. CECSA (ed). 720 p. ISBN 0-471-80458-4.
- Resnick, R; Halliday, D; Walker, J. 2009. Fundamentos de física, V.2 8ed - gravitação, ondas: termodinâmica. LTC (ed). 291 p. ISBN 978-85-216-1606-1
- Rivera, JK; Maturrano, HL; Aguilar, JM; Rosadio, AR. 2015. Detección del Gen PrP de Scrapie en Ovinos Junín (en línea). Rev Inv Vet Perú 2015 26(1): 57-65. Consultado 23 oct. 2021. Disponible en <https://doi.org/10.15381/rivep.v26i1.10917>
- Rutherford, S. 2015. Botanic gardens. USA. Shire Publications Ltd (ED). 75 p. ISBN-13: 978-0-74781-444-3
- Sahd, KJ; Zovatto, D; Rojas, D; Paz, FM. 2022. Riesgo político América Latina (en línea). Santiago, Chile. CEUC (ed). 36 p. Consultado 22 dic. 2021. Disponible en http://centroestudiosinternacionales.uc.cl/images/publicaciones/publicaciones-ceiuc/Riesgo-Politico-America-Latina-2022-_compressed.pdf
- SH (Sistemas Hortícolas). 2017. Pantallas para invernaderos: tipos y materiales (en línea). Sistemas hortícolas Almería. 1-1. Consultado 26 ene. 2022. Disponible en <https://www.sistemashorticolasalmeria.com/blog/pantallas-para-invernaderos-tipos-y-materiales/>
- Stix, M. 2004. The Sun an introduction. Second edition. Freiburg, Germany. Springer (ed). 492 p. ISBN 3-540-20741-4
- Swenberg C.E., Horneck, G., Stassinopoulos E.G. 1991. Biological effects and physics of solar and galactic cosmic radiation par B. Algarve, Portugal. p ISBN 978-1-4613-6265-4. DOI [10.1007/978-1-4615-2916-3](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2916-3)
- Szeicz, G. 2015. Solar radiation for plant growth. Journal of Applied Ecology, 11(2), 617–636. doi:[10.2307/2402214](https://doi.org/10.2307/2402214)
- Taiz, L. Zeiger E. 2006. Fisiología vegetal. Vol I. U.S.A. UJI (ed). 580 p. ISBN 978-84^8021-601-2 (o.c.)
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I.M.; Murphy, A. 2017. Fisiología e desenvolvimento vegetal. 6ª Edicao. Brasil, Artmed (ed). 858 p. ISBN: 8582713673, 9788582713679
- Torres, P. A. (Ed). 2017. Manual de cultivo del tomate bajo invernadero. Santiago, Chile. INIA (ed). 112 p. ISSN 0717 – 4829. <https://www.indap.gob.cl/docs/default-source/default-document-library/manual-de-tomate-invernadero.pdf?sfvrsn=0>
- Torrez, R., Burgoa, A., Ricaldi, E. 2013. Modelos de estimación de la radiación solar para el altiplano central de Bolivia. Revista Boliviana de Física. (23):1–7. <http://www.fiumsa.edu.bo>
- Vázquez, M., Hanslmeier, A. 2006. Ultraviolet radiation in the solar system. Dordrecht, The Netherland. Springer (ed). 380 p. ISBN-10 1-4020-3726-0 (HB)
- Vieira, D.R.A., Ordoñez, J.C. 2021. Fundamentals of renewable energy process. Fourth edition. Estados Unidos de América. Academic press. P. ISBN: 978-0-12-816036-7
- Zaratti, F., Forno, R., Gutiérrez, G. 2010. Medidas de albedo en UV-B en el salar de Uyuni (en línea). Revista Boliviana de Física. 1-8. Consultado 28 ene. 2022. Disponible en http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1562-38232010000100002

Artículo recibido en: 04 de febrero de 2022

Aceptado en: 22 de marzo de 2022