

Iluminación del acuario plantado – Parte I

Generalidades

Introducción

Este breve resumen intenta corregir algunos mitos y reglas mágicas sobre la iluminación de los acuarios plantados, así como también, orientar al aficionado en la elección y dimensionamiento de la fuente luminosa a utilizar en cada caso. No pretende en absoluto agotar el tema, ya que, debido a la variabilidad de opciones al respecto, sólo tiene la intención de conformarse en una guía de análisis del problema.

A la pregunta de cómo iluminar el acuario plantado, no existe una respuesta única, y la elección de la fuente luminosa dependerá fundamentalmente de las dimensiones del mismo, espacio superior disponible, tipo y densidad de vegetación, presupuesto inicial, gasto mensual admisible y gusto del propietario. Como en muchos otros aspectos de la vida, en este tema también existen varias soluciones posibles, no siempre unívocamente determinadas. Algunas de ellas serán óptimas, otras en cambio serán más económicas pero imperfectas, y otras simplemente, cubrirán las exigencias necesarias utilizando la “fuerza bruta”. Si instalamos una fuente luminosa que excede nuestras necesidades (pero debajo del límite de perjuicio, si es que existe ese límite), seguramente obtendremos el éxito esperado, pero a costa de un mayor desembolso inicial, gasto mensual energético y costo de reposición a futuro.

Este trabajo intenta orientar solamente en cómo elegir la potencia y el espectro de una fuente luminosa que sea óptima para nuestras necesidades, enunciando qué procesos físicos ocurren en nuestro acuario que impiden que toda la energía proporcionada sea utilizada por nuestras plantas. Lógicamente entonces, no intenta ni puede, cubrir todas las posibles soluciones al tema.

Mucho se puede discutir en cuanto a lámparas y su idoneidad para la función exigida pero poco se puede decir de la percepción subjetiva y estética por parte del propietario del acuario. Es habitual observar discusiones acerca del “tono” de la luz del acuario o sobre el “verdadero color” de los elementos y seres vivos exhibidos en su interior. Los dos conceptos

entrecorridos corresponden a percepciones individuales, carentes de lógica y, en la medida que se satisfagan las exigencias primarias del acuario en cuestión, son todas equivalentes. Digo carente de lógica, debido a que el concepto “verdadero color” está plagado en este caso, de vicios de estética y gusto personal.

Con esto no quiero restar importancia al componente estético, que es generalmente uno de los motores principales del acuarista, pero no haré mención (salvo excepciones muy notorias) a la tonalidad final de la iluminación resultante, por considerarlo un factor subjetivo y que tiene que ver incluso, con la percepción final que plasma el acuario en el ambiente que lo rodea.

Para poder entender qué fuentes luminosas debemos seleccionar para iluminar nuestro acuario, debemos entender primero qué significan algunos parámetros que las caracterizan. Para esto es necesario además entender, y sacarle el máximo provecho, los parámetros de las hojas de datos que nos entregan los fabricantes de las distintas luminarias¹ y fuentes luminosas.

En este trabajo tocaré superficialmente temas que poseen implicancias y sutilezas profundísimas en la física, biología o ingeniería lumínica; sepan disculpar los expertos en cada área por la brutal simplificación que deberé hacer para poder acotar el texto a los objetivos y alcances del acuarismo. El lector que desee profundizar en estos temas puede recurrir a la extensa bibliografía existente sobre cualquiera de ellos.

Demás está decir que estoy abierto a cualquier discusión sobre el contenido de dicho trabajo o la corrección de cualquier error que pudiese haber cometido involuntariamente.

¹ Distingo el término ‘luminaria’ de ‘fuente luminosa’ debido a que en algunos países de habla hispana se denomina luminaria al aparato que contiene la fuente luminosa. Durante este trabajo utilizare sólo el término ‘lámpara’ como sinónimo de fuente luminosa.

¿Cómo se describe la radiación emitida por una fuente luminosa desde el punto de vista del ojo humano?

Teniendo en cuenta los alcances de este trabajo, voy a definir como fuente “luminosa” a aquella que emite radiación electromagnética en el espectro visible al ojo humano sano promedio. En algunos casos será necesario ampliar un poco el rango de trabajo para incluir el ultravioleta e infrarrojos cercanos al espectro visible, pero en cada caso haré la aclaración pertinente. Acotaré entonces el término “luminoso” como aquel

conjunto de radiaciones electromagnéticas cuyas frecuencias se encuentran en el rango antes citado.

La radiación luminosa que nosotros denominamos comúnmente “blanca”, es el resultado en realidad, de sumar varias radiaciones de distintas frecuencias o colores. Todo el mundo ha visto alguna vez un “arco iris” causado por la difracción de un haz

luminoso sobre una superficie¹ o la transmisión del mismo a través de un medio, transparente o semitransparente, cuyo índice de refracción sea dependiente del “color” de la luz que lo atraviesa (un prisma de cristal o una gota de agua por ejemplo). La percepción de los colores es el resultado de cómo nuestro cerebro interpreta las distintas frecuencias que componen el haz de luz original que fueron recibidas por el ojo. A la radiación luminosa que no está compuesta por la suma de radiaciones de distintos colores, es decir, es de una sola frecuencia, la denominaremos monocromática. El resto serán policromáticas. La luz blanca (solar por poner sólo un ejemplo), es la suma de una cantidad inmensa de componentes monocromáticos distintos y, de acuerdo a cuáles sean las cantidades relativas de cada una de ellas en la suma total, la luz observada tendrá tonalidades distintas. A cada una de estas componentes monocromáticas le corresponde una frecuencia y, justamente, la manera más exacta de describir la radiación emitida por una fuente luminosa, es informando qué cantidad de luz de cada una de estas frecuencias son emitidas por la misma. Esto normalmente se representa mediante un gráfico donde se expresa cantidad de radiación en función de la longitud de onda o curva espectral. Este gráfico es como la “huella digital” de una fuente luminosa, ya que la distingue de las otras. Por ejemplo, la curva espectral en el rango del visible de la radiación solar es la siguiente.

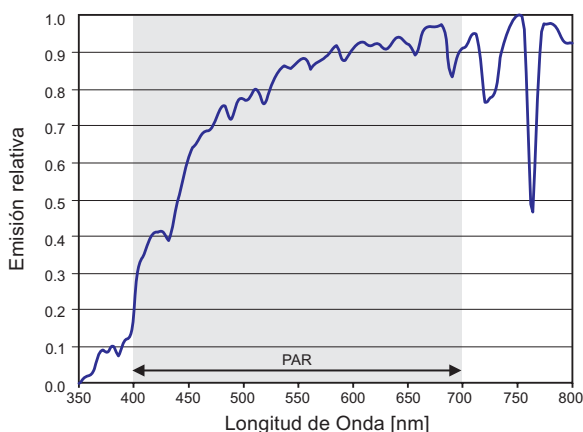


Ilustración 1: Espectro Solar (Adaptado de <http://cc.joensuu.fi/photobio/lamps.html>)

Puede observarse que en el eje horizontal se representan las frecuencias que la componen, mientras que en el vertical se representan las cantidades relativas o absolutas de cada una de ellas.

Al principio de este apartado, indiqué que me acotaría al espectro de radiación en el rango visible, pero no he definido cuál es ese rango. Para ello debo enunciar primero que el ojo humano es capaz de distinguir sólo un pequeñísimo rango de las frecuencias que componen la radiación electromagnética, y ese rango se encuentra entre los 400 y 700² nanómetros [nm] (1 nm = 10⁻⁹ metros). Si bien el nanómetro es una medida de longitud, para el caso de la radiación

electromagnética viajando en el vacío, puede asignarse inequívocamente una longitud de onda para cada frecuencia y, por ser de uso más extendido y resultar más simple para nuestros objetivos, preferiré el valor de la longitud de onda al de la frecuencia.

El ojo humano no sólo percibe una parte ínfima del espectro electromagnético, sino que además lo hace con distinta eficiencia para cada frecuencia. Si trazase una curva similar a la espectral, pero que represente la cantidad de luz que nuestro ojo percibe para cada longitud de onda observaríamos en la mayoría de los casos, algo similar a esto.

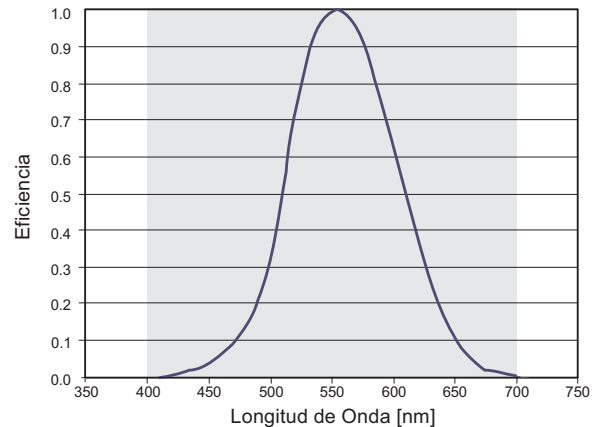


Ilustración 2: Curva fotópica para luz brillante (visión en colores)

Esta curva experimental, denominada comúnmente fotópica, representa qué tan bien percibe los distintos colores el ojo humano. En este gráfico se puede observar que el ojo humano ve mejor el verde-amarillento (555 nm) que cualquier otro color. Inclusive, podemos observar que es relativamente poco sensible a los rojos y azules, y nulo más allá de los extremos marcados por los 400 y 700nm. Justamente, los nombres de ultravioleta (mas allá del violeta) e infrarrojo (por debajo del rojo) se refieren a las frecuencias que están mas allá de la visión humana promedio a ojo desnudo.

Desde el advenimiento de las fuentes lumínicas artificiales, se intentó buscar algún tipo de parámetro que indicase cuál era la calidad relativa de esa luz con respecto a la luz denominada natural o solar. Comúnmente en los manuales de iluminación y hojas de datos de los distintos fabricantes podemos observar dos de ellos. El coeficiente de reproducción de colores o CRI³ y el índice de color correlacionado.

Coeficiente de Reproducción del Color

El CRI es un estándar definido a mediados del siglo XX, que indica qué tanto se aparta la reproducción de ocho colores muy específicos, de la reproducción que tendrían los mismos al ojo humano, si estuviesen expuestos a la luz solar. El valor mínimo es 0 y el máximo es 100. Este coeficiente no describe cómo esta compuesta la curva espectral de la lámpara. De hecho, una fuente luminosa puede no percibirse igual que la luz solar pero tener un CRI cercano a 100.

Es un valor muy útil y utilizado en lumínotecnia, ya que el ojo humano, frente a fuentes luminosas de CRI > 90, normalmente tiene una

¹ El caso más común de este tipo de fenómeno en los últimos años, es la “reflexión” de la luz sobre el lado de información de un disco compacto para lectura óptica.

² El rango de radiaciones consideradas en el visible, varía ligeramente entre distintos autores, pero tomaré el más general.

³ Por sus siglas en ingles, Colour Reproduction Index

percepción de los colores casi natural. Entenderemos por percepción natural, a aquella que se produce cuando no media ninguna lámpara artificial, se esta a la intemperie, el cielo esta despejado y el sol no esta iluminando directamente el objeto.

Este parámetro sirve por lo tanto para elegir la fuente luminosa apropiada si nuestros fines tienen que ver con reproducciones de colores, teñidos o impresos gráficos, destinados al ser humano y apreciables en el aire y no dentro del agua.

Índice de Color Correlacionado

El índice de color correlacionado es un valor que me indica a qué temperatura debería calentarse un cuerpo opaco (un pedazo de carbón por ejemplo) para observar con nuestros ojos que emite una luz similar a la observada en la fuente luminosa artificial. Es necesario recalcar que si bien está medido en grados kelvin¹, no representa en la mayoría de los casos la temperatura a la que se halla la fuente luminosa evaluada, sino que es la temperatura a la que se encuentra el cuerpo opaco que se utilizó para comparar.

De la experiencia diaria sabemos que si un trozo de carbón es calentado, comienza a emitir una luz rojiza que se vuelve más amarilla a medida que la temperatura del mismo aumenta.

Las lámparas incandescentes son quizás el único caso donde la temperatura del filamento de la misma, puede decirse que es muy similar al valor de este índice. En el resto de los casos se debe recordar siempre que este hecho no se cumple. Los valores de este índice típicamente van desde los 3.000 °K de las lámparas incandescentes más económicas, a los 12.000°K alcanzados en la radiación del cielo azul y algunos tipos de lámparas de descarga.

Como en el caso del CRI, este índice no nos indica cómo esta compuesta la radiación luminosa pero nos da una idea de la tonalidad de la misma, y cuáles son las longitudes de onda predominantes. Por debajo de aproximadamente 5.000°K la luz se verá rojiza o “cálida” (como le gusta llamarlo a los fabricantes), mientras que valores superiores representan luces azuladas o “frías”. Respectivamente estos casos representan lámparas con emisiones de frecuencias predominantemente rojas o azules. Observar que los términos cálido y frío dados por los fabricantes, están

¹ La escala Kelvin se utiliza para medir temperaturas absolutas o termodinámicas. Hay que destacar que es incorrecto hablar de “grados kelvin” ya que debe decirse simplemente Kelvin, pero su uso es extendido y bastante aceptado por la comunidad científica. A los alcances de este trabajo sólo es necesario saber que está definida de manera tal que los 0°C y 100°C equivalen respectivamente a 273.15K y 373.15K.

totalmente contrapuestos a la temperatura real del cuerpo negro que se utiliza para comparar, están relacionados sólo con la percepción humana de los mismos.

Lumen, Lux , candelas...

Los dos parámetros anteriores aparentemente definen la calidad de la luz emitida por determinada fuente luminosa, por lo que falta sólo definir la “cantidad” de luz que esa misma fuente emite. Debido a que la mayoría de las lámparas son diseñadas para ser utilizadas por seres humanos, los parámetros de cantidad de iluminación emitida tienen en cuenta en general, sólo la que percibe el ojo humano.

Para definir esta cantidad consideraré, de toda la radiación emitida, sólo la emitida en el rango visible, afectada por la eficiencia con la que nosotros percibimos ese color (curva fotópica). Como existen varias unidades para medir estas cantidades, me acotaré a las definidas por el Sistema Internacional. Utilizaré el lumen como indicador de flujo lumínico y el lux como medida de iluminación. ¿Pero en que se diferencian dichos parámetros?

El lumen mide la “cantidad” de radiación (energía) que emite la fuente por segundo², es decir, cuánta energía lumínica es emitida por una fuente luminosa determinada en un segundo, mientras que el lux mide cuánta de esa energía llega a una superficie dada en el mismo tiempo. La primera conclusión es que la medida en lumen no depende de la geometría del reflector, o de la distancia al objeto ya que tiene en cuenta solamente la cantidad de energía luminosa emitida por la fuente. Este valor sirve para comparar eficiencias entre lámparas distintas o emisión de una en particular, pero en nada indica qué tan iluminado está el ambiente o área deseados. El lux en cambio, indica qué cantidad de iluminación está llegando al objeto a iluminar en cuestión. Las tablas de requerimiento de iluminación están dadas generalmente en Lux, y para poder obtener cuántas lámparas son necesarias para lograr determinado valor, será necesario tener en cuenta el reflector utilizado y la distancia a las lámparas. No se debe olvidar que el valor en lúmenes depende exclusivamente de lo que el ojo humano puede percibir del total emitido.

² El procedimiento exacto para definir qué cantidad experimental es asociada con 1 lumen está fuera de los alcances de este resumen, pero debido a que se utiliza como patrón la radiación de un cuerpo negro a una temperatura que ubica el centro de emisión en los 556 nm (punto de solidificación del platino), el resultado es una medición “acomodada” a lo aprovechable sólo por el ojo humano.

¿Cómo percibe la radiación emitida por una fuente luminosa un vegetal?

De la misma manera que el ojo humano posee una determinada sensibilidad a las distintas frecuencias que componen la radiación luminosa, las plantas poseen su equivalente. Ellas utilizan la energía lumínica para poder sintetizar sus alimentos a partir de sustancias inorgánicas elementales. Para poder absorber la radiación que reciben, desarrollaron

mecanismos complejos donde varios pigmentos especializados³ interactúan con la radiación lumínica. Si representase en una curva como la fotópica, la sensibilidad de los vegetales a las distintas frecuencias de la luz observaría una gráfica similar a esta.

³ Los pigmentos principales son la clorofila A y B y los carotenos.

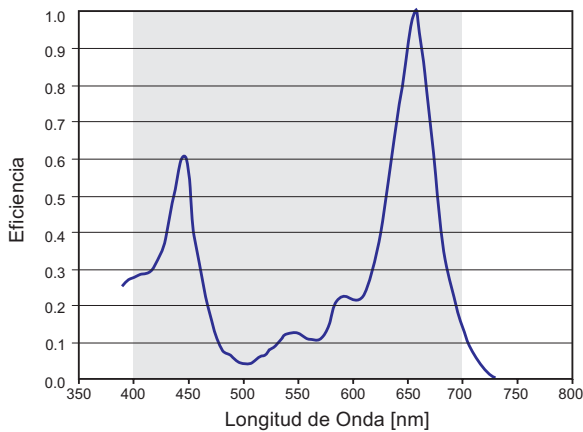


Ilustración 3: Curva de respuesta de la clorofila a y b (adaptado de hoja de datos GRO-LUX®)

Y aquí encontramos la primera sorpresa. Los rangos principales de absorción de luz por parte de los vegetales son 430-450 nm y 625-680 nm¹, mientras que el ojo humano tiene el pico máximo en el 530-590 nm. Justamente, las plantas son sensibles a frecuencias en las cuales el ojo humano es poco sensible y son prácticamente ciegas al color que nosotros mejor vemos que es el verde-amarillento (o amarillo verdoso, depende del gusto del lector). Si bien hay infinidad de estudios de laboratorio llevados a cabo para determinar esto, la comprobación tangible de que las plantas no utilizan el verde, es que justamente las vemos de ese color. El ojo humano es sensible a la luz reflejada que proviene de las hojas de las plantas. Si ha sido reflejada en su mayoría², es que no ha sido absorbida, y por lo tanto no aprovechada por la planta en sus procesos internos.

Existe un problema, y es conciliar las fuentes luminosas para que sean aptas para la vida de los vegetales y a su vez lo sean para el ojo humano. La mayoría de las lámparas se diseñan con la emisión adaptada a la curva fotópica para que la eficiencia de la misma (lumen/Watt) sea óptima. Justamente se intentan evitar las emisiones que se produzcan fuera del rango visible al ojo humano, ya que no reportan mejorías en la emisión en lumen y si representan un consumo que disminuye la eficacia.

Los cuatro valores que habíamos definido para categorizar una fuente luminosa y su nivel de iluminación son el CRI, Índice de correlación de color, lumen y lux. Todos ellos están definidos desde la sensibilidad del ojo humano y no desde lo que necesita un vegetal, por lo que su utilización en las plantas es, si no errónea, al menos poco acertada e ineficiente. Es necesario entonces definir nuevos parámetros que sirvan a nuestro propósito específico.

Buscando la analogía a los parámetros anteriores definiremos primeramente el rango de actividad fotosintética PAR³, que es igual al rango visible determinado para el ojo humano (400-700 nm), pero esta vez no lo modificaremos con la respuesta del mismo o curva fotópica. Al no evaluar la radiación emitida por la fuente luminosa por la eficiencia con la

que el ojo humano la percibe estamos obteniendo el valor de cuánta radiación se emitió en el rango visible. El valor PAR define entonces una medida similar al lumen en cuanto que mide flujo luminoso, pero en lugar de medirlo en unidades de potencia lo hace como cantidad de fotones⁴ emitidos en el rango visible.

En el proceso de fotosíntesis, no es relevante el color de cada fotón individual que interactúa con el pigmento especializado, sino simplemente si la interacción se produjo o no. Hay que observar que en este caso me estoy acotando al proceso fotosintético en sí. No estoy asegurando que al vegetal le resulte exactamente igual recibir cualquier fotón, sino que el efecto causado una vez que se produce la interacción, es el mismo desde el punto de vista de la fotosíntesis exclusivamente.

Debido a que el PAR mide cantidad de partículas, posee una diferencia importante con el lumen, que mide directamente flujo de energía. En el caso del PAR, es imposible obtener el valor del flujo de energía si no se conoce la curva espectral de la fuente luminosa. Al ser el PAR una medida de cantidad de partículas se mide en moles⁵ de fotones o micro moles (mas apropiado a nuestros fines).

Para mejorar la precisión que este valor tendría a nuestro fines en cuanto a la comparación entre distintas fuentes luminosas, y pensando específicamente en los vegetales e intentando obtener un parámetro que nos permita evaluar la calidad de la radiación emitida, afectamos este resultado por la eficiencia con la que los vegetales ven esta radiación (de la misma manera que lo habíamos hecho para el ojo humano en el caso del lumen) y obtenemos el rango usable fotosintético PUR⁶. Este valor representa exactamente cuánto de la emisión de la fuente luminosa puede ser aprovechable por la fotosíntesis en el vegetal. Además podemos distinguir la contribución del PUR por el extremo de los azules y de los rojos para definir dos magnitudes secundarias y complementarias, el PURR (rojo) y PURA (azul). Si bien esta elección es arbitraria, consideraremos dentro del alcance de este trabajo como pertenecientes al PURR a las partículas cuya longitud de onda se encuentre entre los 600 y los 750 nm, mientras que al PURA lo harán las que se encuentran entre los 400-500nm.

Hay que recalcar un dato interesante. No existen equivalentes al CRI y al índice de temperatura correlacionados en el caso de los vegetales, debido a que los mismos no distinguen el color de la radiación absorbida desde el punto de vista de la absorción fotosintética, como sí lo hace el ojo humano. Empíricamente se ha demostrado que el efecto que causa un fotón rojo absorbido por la clorofila B es indistinguible del azul absorbido por la clorofila A. De todas maneras se recomienda mantener las fuentes lumínicas “balanceadas” en el PURR y PURA, debido a que hay resultados experimentales que demuestran

⁴ El fotón es la entidad definida por la física como partícula portadora de la energía de la radiación electromagnética.

⁵ Un mol es una constante universal, conocida como número de Avogadro, definida como $6.02 \cdot 10^{23}$ y representa la cantidad de sustancia de una composición determinada que contiene el mismo número de partículas que átomos hay en 12g de ¹²C puro.

⁶ PUR por sus siglas en ingles, Phosynthetic Usable Radiation.

¹ Según los autores y la especie estudiada existen pequeñas variaciones a estos dos rangos.

² Parte de la radiación emitida puede originarse en fluorescencias de algunos de los pigmentos vegetales, pero debido a la poca incidencia de esto en el total emitido no lo tendré en cuenta.

³ Por sus siglas en ingles, Phosynthetic Active Radiation.

alteraciones morfológicas en vegetales que han sido expuestos a sólo uno de los dos extremos del espectro o uno muy deficiente relativo al otro. Esto se origina en que no todos los pigmentos vegetales que interaccionan con la luz se dedican a la fotosíntesis y algunos tienen funciones ligadas a la producción de fitoreguladores o enzimas específicas. La radiación solar tiene normalmente un coeficiente PURA/PURR menor a 1 y mayor a 0,9.

Desgraciadamente casi todas las hojas de datos de las lámparas comerciales carecen de la información acerca de los valores de emisión PUR Rojo y Azul. En la bibliografía y anexos podrán encontrar algunas tablas de estos valores para distintas lámparas comerciales. Sin estas tablas, la única manera de evaluar cuánto realmente de la potencia entregada por la lámpara está siendo aprovechada para la fotosíntesis, es analizando cuidadosamente la curva espectral provista por el fabricante y convirtiendo la potencia emitida en cada longitud de onda a la cantidad de partículas que ella representa.

Es importante destacar que una lámpara que emita casi toda la energía en el rango fotópico (amarillo verdoso) pero poco en el fotosintético, permitirá el crecimiento de los vegetales, pero con un consumo comparativamente mayor que el que hubiese resultado de una lámpara especializada. Si el objetivo final es justamente tener mucha emisión en el rango perceptible al ojo humano, entonces la elección fue adecuada, pero si se desea estimular el crecimiento de las plantas y sólo entregar un nivel de iluminación óptimo para su visualización, entonces la elección fue equivocada. Comúnmente, para lograr el mismo crecimiento que se hubiese obtenido con un espectro optimizado para la fotosíntesis, es necesario agregar más potencia en las lámparas. Muestra de esta práctica

usual es la frase tan común como equivocada: “es mejor cantidad que calidad”. Esto no solo constituye un grave error conceptual, sino que también ataca el concepto de uso y consumo responsable de la energía por parte del ser humano. Como acuaristas deberíamos ser de los primeros interesados en un uso responsable de los recursos que invariablemente conlleva a la preservación de los medio-ambientes que deseamos imitar y disfrutar en nuestros acuarios.

Lamentablemente sólo en los últimos años los cultivadores de plantas acuáticas han comenzado a cuantificar el nivel de radiación al que han desarrollado sus plantas. Inclusive hoy en día, se siguen utilizando medidas absolutamente subjetivas como: poco-iluminado, medianamente-iluminado y muy-iluminado. Imprecisiones como esta desorientan al aficionado. ¿Cuánto es muy iluminado? ¿Significa lo mismo para un acuarista de pueblos nórdicos o sureños, que para uno que habita en el trópico? Desgraciadamente, algunos aficionados de buena voluntad, quisieron compensar este error, e introdujeron medidas de luminosidad en LUX, logrando sólo agregar más confusión al problema. Es común leer o escuchar críticas a la “poca luminosidad” de las lámparas especializadas para agricultura. Sólo por poner un ejemplo, el tubo fluorescente TLD950 de la firma Philips posee un valor de emisión medido de 2.350 lúmenes y $43 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$, mientras que el GRO-LUX de Sylvania posee 1.200 lúmenes y $42 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$. Si un aficionado introdujo dos lámparas GRO-LUX para llegar al nivel de iluminación en lúmenes que otro acuarista tenía en su acuario con un solo TLD 950, simplemente duplicó el nivel de radiación sobre sus plantas, además de duplicar la inversión inicial y el consumo eléctrico.

Obtener el parámetro PAR para una lámpara.

Lo primero que hay que tener en cuenta antes de intentar obtener los $\mu\text{mol PAR}$ entregados por una fuente luminosa sin medirla con un instrumento apropiado, es que siempre será una tarea inexacta, introduciéndose errores metodológicos y otros debidos a las imprecisiones de los fabricantes. Desde hace unos años, los organismos gubernamentales ligados a la agricultura y cultivo de vegetales, están recomendando a los fabricantes que incluyan estos valores en sus tablas de especificaciones. En un tiempo corto este valor debería estar en todas las hojas de datos y no será necesario su cálculo. A su vez, la comunidad científica sería, está publicando los resultados de los trabajos en μmol en lugar de hacerlos en Lux, que está considerado ya una medida no correcta de la radiación, cuando están involucrados procesos fotosintéticos.

Debido a la poca información actualmente provista por los fabricantes de lámparas, la obtención del número de moles de fotones emitidos por una fuente luminosa solo puede hacerse de tres formas distintas:

- a) Mediante la medición directa con un instrumento apropiado.

- b) De la conversión de la curva espectral potencia $\rightarrow \mu\text{mol PAR}$.
- c) Mediante las tablas aproximadas para otras lámparas similares obtenidas anteriormente por alguno de los dos métodos anteriores.

Asumo que el método a) no está disponible para el aficionado promedio, por lo que simplemente lo descartaré. La opción c) es la más tentadora y puede observarse en el Anexo I diversas tablas con los valores de conversión aproximados PAR para algunas lámparas comerciales.

Este método adolece del defecto de introducir un factor de error enorme. Si bien personalmente opino, que este queda solapado por las incertezas provenientes de la geometría de los reflectores, coeficientes de absorción/dispersión del agua del acuario, Etc., muchos acuaristas desearán obtener valores más exactos utilizando la curva espectral como fuente de información. Es entonces el método b) el más apropiado para obtener el parámetro PAR de una fuente luminosa específica en forma teórica.

Para poder obtener el número de fotones emitido a partir de la cantidad de energía emitida por la

lámpara por longitud de onda¹, es necesario recordar primero que la energía del fotón esta expresada por la ecuación

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

Donde:

E = energía del fotón medida en Joule

h = constante de Planck $6.63 \cdot 10^{-34}$ J·s

c = velocidad de la luz $\approx 3 \cdot 10^8$ m·s⁻¹

λ = longitud de onda en m

¹ Esta es la forma más usual de los espectros entregados por los fabricantes, quienes poseen la longitud de onda en las abcisas y la potencia emitida en la ordenada. Verificar previamente las unidades de la ordenada y convertir a las que resulten apropiadas.

Efectos de la columna de agua en la transmisión de la luz

Los efectos ligados a la alteración que sufre un haz luminoso que se transmite por el seno de un líquido con partículas en suspensión, como es el agua del acuario, es un problema complejo y difícil de modelar². En todos los casos es necesaria una medición empírica que permita cuantificar el problema en cada uno de nuestros acuarios e inclusive, es necesario realizar sucesivas mediciones en el tiempo, debido a que el carácter de los efectos sobre la luz evoluciona durante la vida del acuario. No existen trabajos publicados que esclarezcan el rango de oscilación de este parámetro. Si bien utilizaré resultados obtenidos para diversos ecosistemas naturales, estos resultados no pueden ser tomados como indicativos para los acuarios. Sólo en aquellos casos en los que se pueda realizar una minuciosa equivalencia, podría ser válido asumir los resultados de algún tipo de ecosistema en particular. Es necesario realizar una investigación que caracterice este parámetro en los acuarios, si es que deseamos tener una idea clara de qué sucede con la luz que penetra en los mismos.

De todos modos intentaré plantear los efectos más importantes para dar una idea de qué parámetros debemos cuidar para que la iluminación del seno del acuario no se vea seriamente deteriorada por causas evitables e innecesarias.

Cuando la luz atraviesa la columna de agua sufre cambios en su composición relativa. Si pudiésemos seguir la trayectoria de haces muy finos de luz, que de ahora en adelante llamaremos rayos, que ingresan perpendiculares a la superficie del agua, observaríamos que algunos de ellos simplemente desaparecen en el seno del líquido, mientras que otros repentinamente son desviados y apartados de su camino. Los primeros fueron absorbidos por las moléculas del medio, las partículas inorgánicas y orgánicas en suspensión o por las algas siempre presentes. Según sea el caso, producen calor, degradan sustancias o aportan al proceso fotosintético de las algas³. Los segundos impactaron con alguna partícula de mayor tamaño que las anteriores para ser dispersados en todas direcciones. Ambos efectos son

² Modelar, para los alcances de este trabajo, implica representar la realidad mediante una o varias ecuaciones matemáticas, verificando que los resultados predichos por las mismas se ajustan con determinada aproximación a la medición empírica.

³ Existen otros motivos de absorción pero son relativamente de menor importancia.

Reduciendo convenientemente las constantes obtenemos que la ecuación que rige la conversión potencia/cantidad de fotones es

$$\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1} = 8.35 \cdot 10^{-3} \cdot W \cdot \lambda$$

Donde la potencia (W) esta medida en Watt y longitud de onda medida en nanómetros.

Simplemente sumando cada uno de los valores de emisión para cada punto de la curva espectral, obtenemos el numero PAR total y sumando sólo en los rangos definidos previamente para PURR y PURA, obtenemos los correspondientes valores para esos parámetros. El trabajo es tedioso pero sencillo y la precisión del resultado suele valer la pena.

de características físicas diferentes y ambos influyen en la luz que penetra el acuario, reduciendo la radiación disponible para nuestras plantas.

Debido a las dimensiones de los acuarios en general y la calidad de filtración de agua utilizada, podemos utilizar el mismo modelo matemático para representar la cantidad de la radiación luminosa a determinada profundidad (ley de Beer-Lambert).

$$I_z = I_0 \cdot e^{-\epsilon \cdot z}$$

Donde:

I_z es la intensidad de la radiación luminosa a determinada profundidad

I_0 es la intensidad luminosa inmediatamente debajo de la superficie.

ϵ es el coeficiente de absorción o dispersión (según corresponda) medido en m⁻¹

z es la profundidad en metros

Nota: En el caso en el que el coeficiente se exprese en cm⁻¹, entonces la profundidad también deberá expresarse en cm.

Comenzando con los procesos de absorción, el primero que hay que tener en cuenta es uno imposible de evitar. El agua pura posee un factor de absorción que depende de la longitud de onda cuyo valor es importante para el extremo rojo. El siguiente gráfico muestra el comportamiento de este parámetro según la longitud de onda

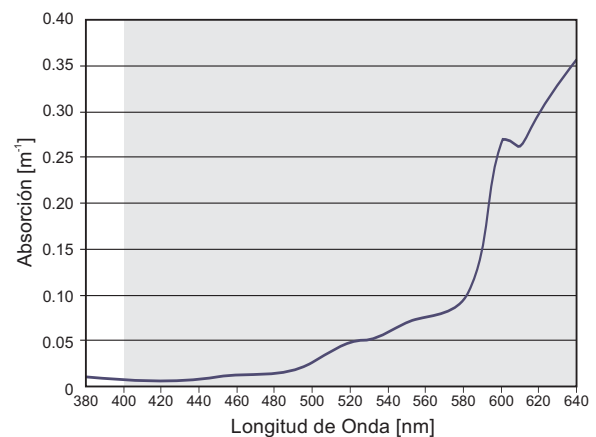


Ilustración 4: Absorción espectral del agua pura (Sogandares, 1997)

Observando el gráfico veremos que la radiación en el extremo de los azules prácticamente no

es absorbida, pero la radiación en el extremo de los rojos, es afectada apenas ingresa en el medio. Para un acuario de 50 cm de columna de agua, sólo el 80% de la radiación de 640 nm de longitud de onda alcanza el fondo, debido únicamente a la absorción intrínseca al agua pura. Este es un hecho de suma importancia. Asumiendo que la vegetación costera muchas veces se halla sólo a unos cm. de profundidad, al intentar mantener esas mismas plantas en un acuario profundo, debemos realizar el ajuste del extremo rojo del espectro en la iluminación proporcionada. Por ejemplo, una planta que normalmente se encuentra a 10 cm. bajo el agua, recibe el 95% de la radiación alrededor de los 640 nm, mientras que a 50cm de profundidad recibiría el 80%. Si tenemos en cuenta que la relación promedio PURR/PURA de la luz solar es de 1.1, deberíamos entonces ajustar el espectro de la lámpara utilizada a una relación equivalente de 1.3. Tal vez no es casualidad, que varios tubos fluorescentes de espectro especial para acuarios de agua dulce, posee esa misma relación de rojos/azules.

El siguiente efecto relevante, es la absorción causada por el material orgánico disuelto. Esencialmente estos materiales se originan en la descomposición de sustancias orgánicas y en la acumulación de ácidos húmicos. Típicamente son sustancias de color amarillento o pardo-rojizo que presentan su máxima absorción en el rango de los azules. Algunas de ellas son degradadas además por las radiaciones más allá de este extremo del espectro visible, aportando nutrientes esenciales para los vegetales. Este valor es dependiente exclusivamente de la cantidad y tipo de las sustancias disueltas en el acuario, y la única manera de realizar una evaluación del mismo es por la comprobación empírica en el acuario en estudio. En la literatura especializada se observa una profusión de valores medidos para medioambientes salinos y dulceacuícolas, pero ninguno para acuarios. Debido a que los valores para lagos y ríos son relativamente elevados y extremadamente variables (desde .05 a 10 m⁻¹) es imposible realizar cualquier tipo de predicción con respecto a este factor. Para minimizar este factor de pérdida de radiación, el acuarista debe intentar mantener las sustancias orgánicas ligadas al sustrato, de manera de que las plantas tengan acceso a las mismas, pero al mismo tiempo no causen pérdidas importantes en la columna de agua. En la bibliografía citada para este punto pueden observarse resultados que sugerirían que en los medioambientes naturales el contenido de compuestos carbónicos orgánicos disueltos DOC¹ está ligado íntimamente con el coeficiente de absorción en el ultravioleta. En la Ilustración 5 podemos observar uno de estos resultados.

El siguiente factor de importancia es la presencia de algas. Debido a la absorción de energía por parte de los pigmentos fotosintéticos, se produce una fuerte absorción en el rango PUR. Asumiendo que en los acuarios plantados se intenta mantener la columna de agua libre de algas y fuertemente filtrada, me tomaré la libertad de aproximar los valores de atenuación a los correspondientes a un sistema

oligotrófico². Si bien un acuario no puede modelarse bajo ningún concepto como un ambiente oligotrófico, por la cantidad de nutrientes disueltos, la acción combinada de los filtros mecánicos y la competencia de las plantas con las algas permite aproximar los valores de cantidad de algas por mililitro³ con la presente en estos medioambientes.

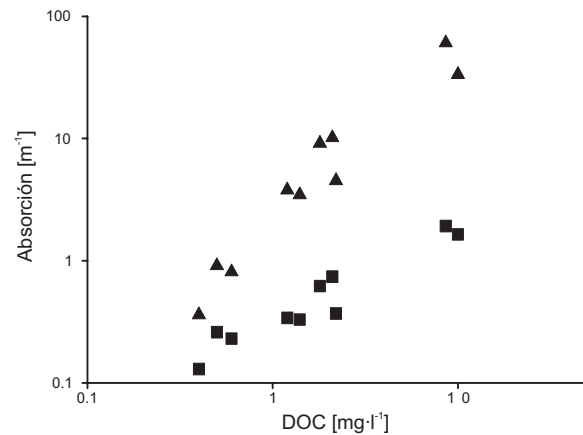


Ilustración 5: Relación entre la atenuación en el rango PAR (cuadrados) y a 320nm (triángulos) para distintas concentraciones de DOC para varios lagos de Nueva Zelanda.

Una curva característica pueden observarse en el siguiente gráfico.

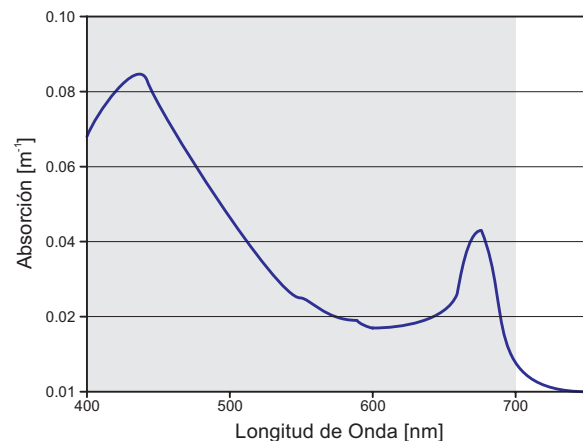


Ilustración 6: Gráfico mostrando la absorción debida sólo por Clorofila a en un ecosistema marino con un nivel de Chla 2mg·m⁻³

El efecto de dispersión⁴, está asociado también a la presencia de materia (orgánica e inorgánica) en suspensión. Si bien tradicionalmente se lo asocia al concepto de turbidez, son en principio dos conceptos independientes. Debido a que, al igual que la absorción, la única manera de estimar fehacientemente este coeficiente, es mediante una medición real⁵, es muy difícil realizar una estimación de este parámetro individual para nuestros acuarios.

² Nombre que se da a los sistemas dulceacuícolas bajos en nutrientes y plantas, con alto oxígeno disuelto.

³ Se mide en la literatura como cantidad de Clorofila a disuelta. Habitualmente se considera 2 µg·l⁻¹ como un valor apropiado para este tipo de ambientes.

⁴ En la literatura se lo denomina por su nombre en inglés "scattering"

⁵ Existen varios modelos matemáticos para representar la dispersión en medios líquidos, pero en todos los casos es necesario realizar una comprobación de campo que valide el modelo a utilizar.

¹ Por sus siglas en inglés, Dissolved Organic Carbon

En la práctica el coeficiente de atenuación-dispersión suele expresarse como un número único (todos los efectos sumados) y promediado en todo el PAR. Este parámetro es mucho más sencillo de utilizar y nos indica cuanta energía en el rango se pierde en relación a la altura de columna de agua. Para utilizar de referencia, en la tabla que esta a continuación se exponen varios coeficientes de absorción promedios para distintos sistemas dulceacuícolas oligotróficos comparados con los valores sugeridos por una famosa página web para aficionados al acuarismo.

Lugar	ϵ [m ⁻¹]
Crater Lake (USA)	0.090
Lago Nahuel Huapi (Argentina)	0.090
Lago Tahoe (USA)	0.120
Lago Moreno Oeste (Argentina)	0.126
Lago Superior (USA)	0.130
Lago Tanganyika (Zaire)	0.150
Lago Guillermo (Argentina)	0.157
Lago Mascardi (Argentina)	0.169
Lago Baikal (Rusia)	0.200
Lago Michigan (USA)	0.210
Lago Huron (USA)	0.300
Lago El Trébol (Argentina)	0.322
Lago Morenito (Argentina)	0.424
Lago Escondido (Argentina)	0.592
Lago Ontario (Canada)	0.650
Lago Erie (USA)	0.700
Grindstone Lake (Canada)	0.820
Ice Lake (USA)	0.830
The Krib mínimo	1.500
The Krib máximo	2.500

Tabla 1: Coeficientes de absorción para distintos medioambientes naturales oligotróficos. Datos recopilados de la bibliografía.

Podemos observar que los rangos generales, los valores totales de ϵ para lagos claros a semi-turbios, pueden considerarse en el orden 0.2 a 0.9 m⁻¹. Eso es claramente menor a los valores estimados por algunos aficionados. Creo que un valor de 0.8 m⁻¹ debe ser el más aproximado a la realidad del acuario plantado correctamente filtrado. No puedo demostrar en este trabajo que esta aseveración sea correcta, debido a que sólo es posible de estimar mediante mediciones empíricas.

De la comparación subjetiva de la transparencia del agua de los acuarios plantados y la correspondiente a la transparencia del agua de lagos oligotróficos, me atrevo a sugerir que los acuarios plantados deben estar dentro del rango aceptable para lagos de este tipo. Es absolutamente necesario realizar un trabajo a futuro que permita obtener los valores máximos y mínimos entre los que se encuentran los coeficientes de absorción total de los acuarios plantados. Debido a que no podemos aseverar un rango en particular, sugiero utilizar dos valores como indicadores de rango en nuestros cálculos. El valor mínimo del coeficiente lo tomaremos del promedio indicado para lagos meso-oligotróficos (.5 m⁻¹) y el máximo lo tomaremos del promedio indicado en "The Krib" (2.0 m⁻¹).

La siguiente tabla nos indica el porcentaje de radiación superviviente para distintas profundidades del acuario y distintos coeficientes.

	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3
10	99	98	97	96	95	94	93	92	91	90	90	89	88	87	86	85	84	84	83	82	81	80	79
20	98	96	94	92	90	89	87	85	84	82	80	79	77	76	74	73	71	70	68	67	66	64	63
30	97	94	91	89	86	84	81	79	76	74	72	70	68	66	64	62	60	58	57	55	53	52	50
40	96	92	89	85	82	79	76	73	70	67	64	62	59	57	55	53	51	49	47	45	43	41	40
50	95	90	86	82	78	74	70	67	64	61	58	55	52	50	47	45	43	41	39	37	35	33	32
60	94	89	84	79	74	70	66	62	58	55	52	49	46	43	41	38	36	34	32	30	28	27	25
70	93	87	81	76	70	66	61	57	53	50	46	43	40	38	35	33	30	28	26	25	23	21	20
80	92	85	79	73	67	62	57	53	49	45	41	38	35	33	30	28	26	24	22	20	19	17	16
90	91	84	76	70	64	58	53	49	44	41	37	34	31	28	26	24	22	20	18	17	15	14	13
100	90	82	74	67	61	55	50	45	41	37	33	30	27	25	22	20	18	17	15	14	12	11	10

Tabla 2: Porcentajes de supervivencia, calculados para distintos coeficientes de absorción (columnas) y distintas profundidades en centímetros (filas).

Otros conceptos físicos a tener en cuenta

Los materiales transparentes o semi-transparentes poseen entre sus características intrínsecas un coeficiente denominado de refracción¹. Mientras que el aire tiene un coeficiente que aproximaremos a 1, el agua destilada tiene un coeficiente de 1.33 y el vidrio, dependiendo de su estructura y composición, valores que oscilan típicamente entre 1.50 y 1.58, aunque tomaremos 1.52

como el más utilizado en el caso de vidrios comunes de acuarios. Necesitaremos utilizar estos coeficientes en los puntos que siguen.

Un rayo de luz es desviado cuando atraviesa superficies que separan dos materiales de índices distintos. A esta línea de separación entre los dos materiales se la denomina interfaz. El hecho que un rayo de luz cambie su camino al atravesarla, es el motivo por el cual vemos quebrado un lápiz que colocamos dentro de un vaso con agua: los rayos reflejados por el lápiz, cambian de dirección cuando

¹ La definición de ese coeficiente o su obtención a partir de las modificaciones que el material hace sobre un campo electromagnético está fuera de los objetivos de este trabajo.

atraviesan la interfaz agua-aire, dando la impresión que proviene de otra posición. Si bien este fenómeno se explica totalmente utilizando ecuaciones de campo, bajo las condiciones de este trabajo, podemos utilizar una sencilla ley que predice este mismo suceso en términos geométricos. La ley de Snell indica en el caso de rayos de luz que llegan a una interfaz, cuál es el ángulo con el que serán transmitidos en función de los índices de refracción y el ángulo de incidencia. Esta ley se puede expresar como

$$n_i \cdot \text{sen}(\alpha) = n_t \cdot \text{sen}(\beta)$$

Donde:

α ángulo respecto a la normal con el que el rayo luminoso incide en la interfaz

β ángulo respecto a la normal con el que se transmite

n_i índice del medio desde el cual viene el rayo luminoso

n_t índice del medio donde el rayo luminoso continúa su camino

Tal vez la Ilustración 7 pueda aclarar un poco los términos utilizados. Del estudio de las leyes que rigen el paso de la radiación electromagnética través de una interfaz, podemos obtener cuatro casos de importancia¹. El primero es que todo rayo que incide normal (perpendicular) a la interfaz continúa su camino sin alterar su trayectoria.

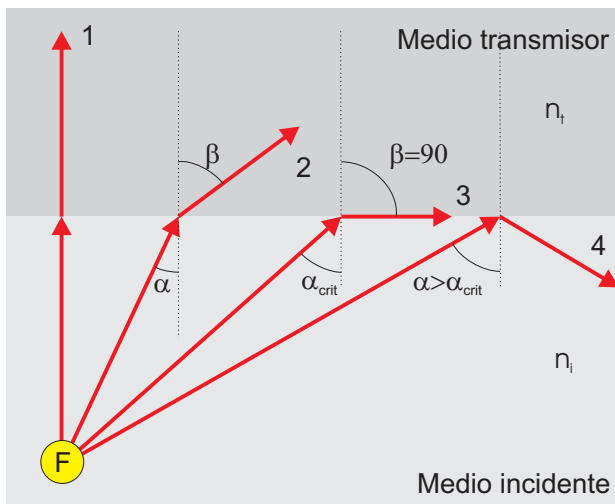


Ilustración 7: paso de un rayo luminoso a través de una interfaz. (en este caso $n_i > n_t$)

El segundo caso es el normal y no merece mayores explicaciones. Para el tercero y cuarto caso debe cumplirse que $n_i > n_t$. En el tercero, cuando el haz luminoso viaja de un medio de mayor índice de refracción a otro con menor índice, existe un ángulo, denominado crítico o de reflexión interna total, a partir del cual toda la luz que incide es reflejada y nada es transmitido².

Para el análisis del ángulo crítico y desde el punto de vista de este resumen, sólo nos interesa el caso, agua-vidrio-aire. Cuando el haz viene desde el

¹ Se pueden obtener como límites matemáticos de la ley de Snell tal cual se escribió en este trabajo, pero cabe aclarar, que estos hechos son previstos más no causados por la matemática utilizada para describirlos.

² Los términos "todo" y "nada" se utilizan como muy buenas aproximaciones dentro de los límites de este resumen.

agua en el interior del acuario, atraviase el vidrio e intenta salir a la atmósfera. El ángulo crítico vidrio-aire es de aproximadamente 41° , y el ángulo de incidencia dentro del agua debe ser 48° . Pasado este ángulo, debido a que existe reflexión total interna vidrio-aire, el haz es reflejado nuevamente hacia el interior del acuario. Al llegar al ángulo de incidencia dentro del vidrio de 61° , vuelve a existir otro fenómeno de reflexión interna total, pero esta vez en la zona vidrio-agua, por lo que la radiación no escapa y queda atrapada dentro del vidrio hasta que se extingue por dispersión. Normalmente este hecho no sucede debido a que, para que el rayo se transmita con un ángulo de 61° en el interior del vidrio, debería haber incidido con un ángulo mayor a 80° desde el agua.

Otro hecho que debe tenerse en cuenta es que todo rayo que incide en una interfaz es en parte transmitida, y en parte reflejada. Las magnitudes de los rayos transmitidos y reflejados pueden obtenerse (dentro de los límites de este resumen) del coeficiente de reflexión de Fresnel.

$$R = \frac{1}{2} \left[\frac{\text{sen}^2(\alpha - \beta)}{\text{sen}^2(\alpha + \beta)} + \frac{\tan^2(\alpha - \beta)}{\tan^2(\alpha + \beta)} \right]$$

Ecuación que puede re-escribirse utilizando la ley de Snell, de manera que todo quede en función del ángulo de incidencia y el cociente de los índices, utilizando la expresión

$$\beta = \arcsen\left(\frac{n_t}{n_i} \text{sen}(\alpha)\right)$$

Si además tenemos en cuenta que en todo momento debe cumplirse

$$R + T = 1$$

es decir, que lo transmitido más lo reflejado es igual al total incidido, podemos verificar que el porcentaje transmitido al agua, en función del ángulo de incidencia para una interfaz aire-agua, se puede representar en un gráfico como el siguiente. Debe recordarse que el rayo incidente pertenece a la zona de aire y los ángulos están medidos con respecto a la normal,

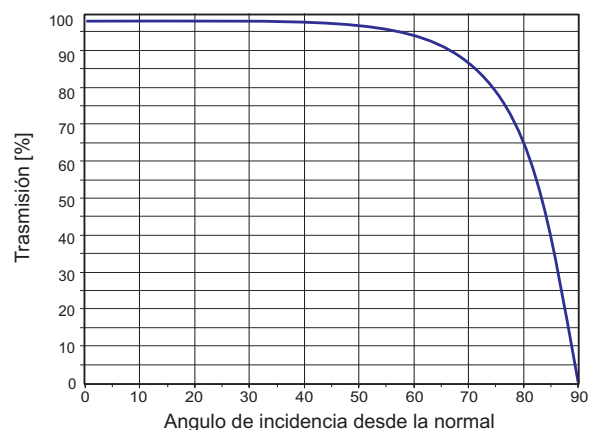


Ilustración 8: Curva de transmisión para una interfaz aire-agua, ángulos medidos desde la normal.

Influencia de la elección del reflector utilizado en nuestra lámpara

Teniendo en cuenta que el coeficiente de transmisión de la luz en una interfaz es proporcional al ángulo de incidencia, se puede demostrar que las pérdidas originadas en la interfaz aire-agua, aire-vidrio (para la cubierta superior) y agua-vidrio para las paredes laterales del acuario son mínimas, si los rayos luminosos emitidos por la fuente llegan perpendiculares (o con un ángulo menor a 10° medidos desde la normal) a cada una de las dos primeras interfaces. Esto puede lograrse adosando un reflector a las lámparas utilizadas. Generalmente las lámparas de alta presión son adquiridas con reflectores apropiados, pero no sucede lo mismo con los tubos fluorescentes.

En el caso de no utilizar un reflector en las lámparas del acuario, sólo una muy pequeña parte de la radiación emitida por las mismas cumple esta propiedad, mientras que el resto de los rayos se desvían perdiéndose por transmisión a través de las paredes laterales o reflejándose en la superficie del agua.

No es la intención de este trabajo hacer un estudio de las posibilidades de pérdida en situaciones intermedias, es decir frente a reflectores ineficientes, y sólo se realizará el estudio para las dos situaciones extremas, es decir, un reflector ideal y una fuente luminosa sin reflector. Para el mismo se utilizará la premisa de que existe una lámpara que emite sus rayos en forma radial desde un punto central, y lo hace a lo largo del acuario, de manera tal que puede tomarse un corte cualesquiera y asumir que el resto es similar. Las fuentes que cumplen con dicha condición son generalmente los tubos fluorescentes, aunque debe considerarse, que la intensidad luminosa emitida en el centro del mismo es mayor que en los extremos.

Veremos entonces qué sucede en el caso en el cual no existe reflector alguno. La Ilustración 9 indica las zonas de interés. Para el mismo se asume que la fuente luminosa está en alguna posición entre el borde del acuario y la superficie del agua, y por comodidad se dibujó solo la mitad. En el caso de existir más de una fuente luminosa deberán rehacerse los cálculos para cada una y para cada lado de la misma. Las consideraciones del siguiente análisis son sólo por óptica geométrica y no tienen en cuenta las pérdidas de intensidad en el medio. Para simplificar este ejemplo, y poder aportar un resultado numérico y tangible, que sirva de evaluación, consideraré que $h=40$ cm, $y=10$ cm y $x=20$ cm¹.

A continuación haré un breve análisis de lo que sucede en las tres zonas delimitadas en la Ilustración 9.

Zona I: Es la zona comprendida entre la perpendicular trazada desde el centro de la lámpara al fondo del acuario (0° para las ecuaciones vistas en el punto anterior) y el ángulo exacto del rayo que incide en el límite entre el vidrio lateral y el substrato. Consideraré que la radiación emitida por la fuente en este rango alcanza el fondo del acuario sin que intervengan

efectos de reflexiones internas en las paredes laterales, y por lo tanto la única pérdida de radiación se encuentra en la reflexión en la superficie del agua. El ángulo entonces que actúa de límite puede ser calculado en función de los distintos parámetros y para el caso del ejemplo es aproximadamente $27^\circ 30'$. Los siguientes resultados los obtendré por integración numérica simple con intervalos de 1° . La ecuación hallada para el coeficiente de transmisión indica que casi todo ha sido transmitido (99.5%), y por lo tanto el 15.2% de la radiación emitida por la lámpara ingresa al acuario en esta zona.

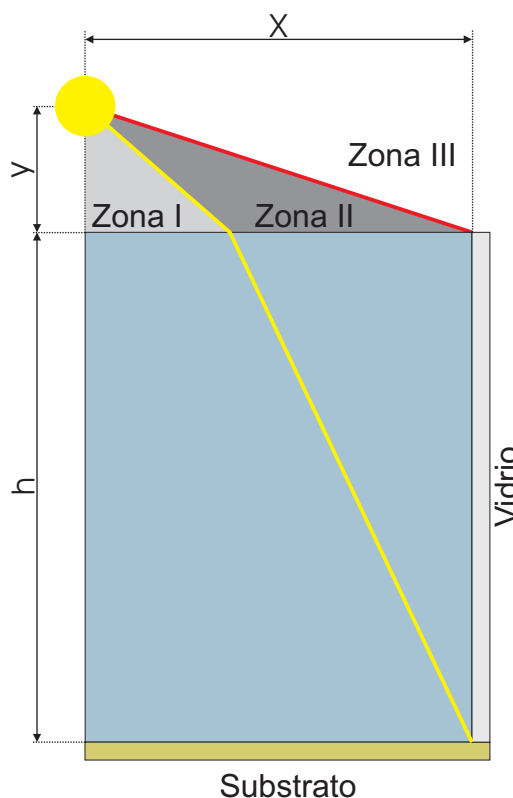


Ilustración 9: Primer caso de análisis

Zona II: comprendida entre el límite anterior y el punto de unión agua-pared del vidrio lateral. En este ejemplo ese ángulo es de $63^\circ 26'$. Utilizando la misma ecuación de transmisión se obtiene que en esta zona ingresa 19.8% de la radiación de la lámpara (99.3%). Debido a la reflexión total interna en la interfaz vidrio-aire de la pared lateral, casi toda la radiación ingresada en esta zona reingresará al acuario. Puede considerarse como aproximación que el 95 % reingresa por reflexión en la pared lateral. El aporte final de esta zona es entonces del 18.8% de lo emitido por la lámpara.

Zona III: consideraré que la radiación emitida en esta zona es prácticamente perdida en el ambiente y no contribuye a la iluminación del acuario. Metalizar las paredes de la tapa produce notables mejoras, pero que en el mejor de los casos permitiría asumir que un 70% de la radiación de la zona puede ser utilizada en el acuario

¹ Estos valores corresponderían, por ejemplo, a un acuario de 50cm de altura y 40 cm de ancho. La fuente luminosa a 5 cm del borde superior y en el centro del acuario.

La contribución de las dos zonas es de aproximadamente el 34% de la emisión total de la lámpara. Es decir, apenas la tercera parte de lo emitido por un tubo fluorescente suspendido a mitad del acuario y a 10 cm de la superficie del agua, en un acuario de 40cm de columna de agua y 40 cm de ancho, si el acuario no posee un reflector o las paredes internas de la tapa son oscuras, ingresa efectivamente en el acuario.

Agregamos ahora un reflector como indica la Ilustración 10. Como se puede observar en este gráfico, se ha agregado un reflector especialmente diseñado para reflejar toda la radiación emitida por el tubo fluorescente en un ángulo que acote al mínimo las pérdidas por reflexión en la superficie del agua. En nuestro caso el menor ángulo debería ser 27° (para iluminar correctamente el sustrato) y el máximo sería 50° que es donde la reflexión en la interfaz comienza a ser un valor apreciable.

No existen las zonas II y III debido a que toda la radiación ingresa ahora con el ángulo apropiado para que todos los rayos luminosos alcancen el sustrato. En este caso, si se utilizan materiales apropiados en la confección del reflector, el 98% de la radiación emitida penetra hasta el fondo reflejándose apenas el 2%.

Claramente, la diferencia entre los dos extremos es abismal. En el primer caso debo colocar 3 lámparas iguales para compensar las pérdidas sufridas e igualar al segundo caso.

De estos dos ejemplos extremos se entiende claramente la importancia de utilizar un reflector diseñado específicamente para su uso en acuarios. En

la segunda parte de este trabajo se trabajará el tema apropiadamente y se proporcionaran los diseños de varios reflectores que cumplan estas características.

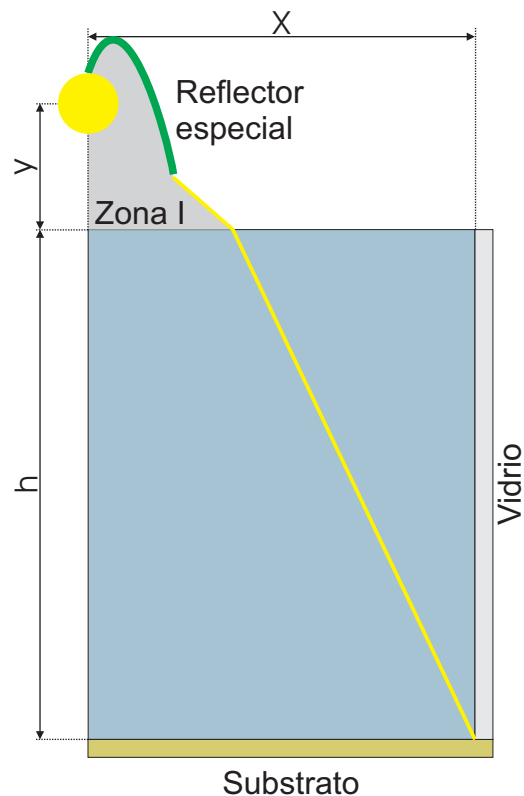


Ilustración 10: Segundo ejemplo, ídem al anterior pero con un reflector adosado a la lámpara.

Efectos de la cobertura de vidrio en nuestro acuario

La cubierta de vidrio que normalmente se coloca en los acuarios para reducir la evaporación y evitar que los peces salten fuera, puede convertirse en una fuente importante de pérdidas lumínicas, en el caso que el mismo estuviese sucio o con incrustaciones. En este trabajo asumiré que el vidrio se halla perfectamente limpio, es transparente y se halla libre de incrustaciones calcáreas. En estas condiciones el vidrio introduce unas pérdidas por reflexión mínimas a moderadas, dependiendo claro está del ángulo que subtienda la lámpara con el cristal. Para el caso del acuario anterior, las pérdidas originadas por un vidrio ubicado a 5 cm de la lámpara y 5 cm de la superficie

del agua¹, y utilizando la ecuación de reflexión citada en el punto anterior, es igual al 6.5% aproximadamente en el caso de no poseer reflector y de apenas el 0.8% en el caso que lo tenga.

Recordar que cuanto más cercana es la posición de la lámpara al vidrio, menor es el ángulo subtendido hacia los extremos del mismo y por lo tanto, aumenta el coeficiente de reflexión en forma considerable. Justamente, si existe un reflector que reduzca el ángulo máximo de incidencia, las pérdidas por reflexión se vuelven insignificantes.

¹ En este caso el ángulo subtendido lámpara-vidrio es 76° en el extremo del acuario.

Distintos tipos de fuentes luminosas artificiales.

Esta sección no intenta agotar bajo ningún aspecto todos los tipos de dispositivos para la emisión de luz, sino que sólo intenta caracterizarlos y colocar sus características principales e interesantes desde el punto de vista del acuarista. Disponibles para el aficionado existen esencialmente dos tipos de fuentes luminosas (existe un tercer tipo que es la emisión por semiconductores pero aún son demasiado onerosas para justificar su utilización):

Lámparas incandescentes

Las fuentes incandescentes son lámparas extremadamente económicas que logran emitir fotones a costa de elevar la temperatura de un filamento de algún material apropiado. Todas, sin excepción,

producen enormes cantidades de rojos y muy pocos azules. Debido a que casi toda la emisión es en la zona del espectro infrarrojo, gran parte de la potencia consumida se emite en longitudes de onda fuera del visible, por lo que son lámparas de baja eficiencia en el rango fotópico. A su favor podemos nombrar que son de fácil instalación y no necesitan grandes cantidades de espacio, adaptándose a casi cualquier medida de acuario. Los nuevos reflectores dicróicos poseen además un poder de penetración en la columna de agua muy apto para acuarios mayores a 50 cm. iluminados solo con tubos fluorescentes, que permite mejorar el PURR a nivel del sustrato. Algunos elementos contaminantes agregados al filamento, producen mejoras en el espectro de salida (como el neodimio que

mejora notablemente la producción de azules), pero a costos de adquisición varias veces mayores que los estándar.

La relación PUR/Watt consumido es pobre y debe tenerse en cuenta el calor producido. Debido a que los fotones son emitidos por excitación térmica, la curva espectral es de pendiente “suave y continua”, prácticamente idéntica a la emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura del filamento. Con estos términos ambiguos, “suave y continua”, quiero indicar que la curva no presenta un valor de emisión para una longitud de onda determinada abruptamente mayor que el que se observa en la vecindad de ese punto. En términos simples, esto implica que dos valores cercanos son sólo un poco mayores o un poco menores, y no radicalmente distintos. Una curva espectral típica de una lámpara dicroica estándar (Ilustración 11) y una enriquecida con neodimio (Ilustración 12) pueden observarse a continuación.

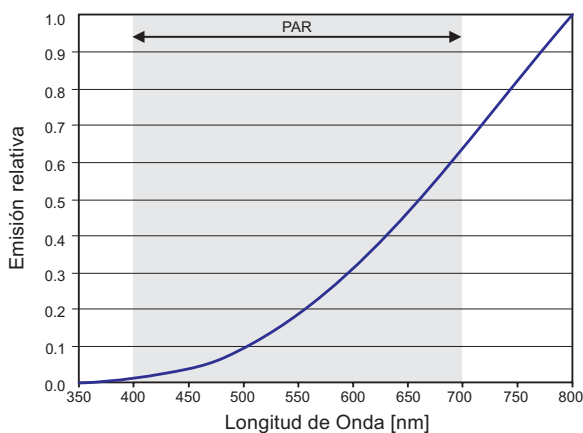


Ilustración 11: Lámpara de tungsteno “Airam LongLife 60w”

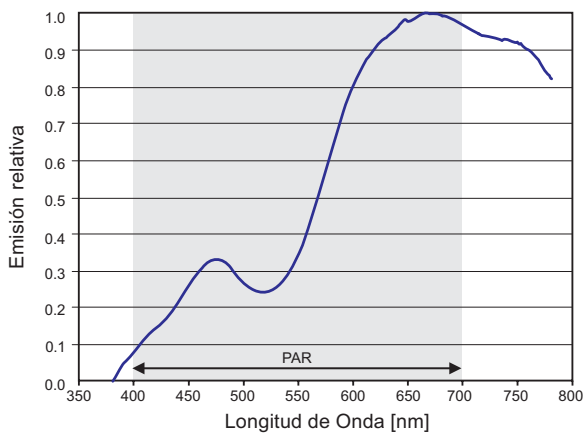


Ilustración 12: Lámpara especial dicroica de neodimio “BLV Eurostar 50w”

Lámparas de descarga

Las lámparas de descarga son lámparas que basan su funcionamiento en la emisión de fotones de energía relativamente alta (zona ultravioleta), generados por la relajación de los niveles energéticos de los últimos orbitales de los átomos de un gas ionizado, que se aloja en el interior de la lámpara y que es excitado por la corriente de alimentación. En otras palabras, la energía suministrada a la lámpara es momentáneamente almacenada por el gas que se halla en su interior, quien a cambio aumenta a un nivel de

energía mayor, pero en un estado inestable. Esta energía “excedente” es liberada una fracción de tiempo después, en forma de radiación ultravioleta, al volver el átomo a un estado de equilibrio estable. Los posibles niveles de energía que pueden almacenar los átomos del gas no pueden tomar cualquier valor (son cantidades discretas o escalonadas perfectamente definidas). Los emitidos a su vez por el recubrimiento de la lámpara al recibir un fotón ultravioleta, tampoco pueden ser cualquier valor y también están distribuidos de manera particular según el material utilizado. Debido a este fenómeno, estas lámparas sí poseen curvas espectrales dominadas por picos de valores de emisión abruptos, rodeados de zonas de prácticamente no emisión u al menos emisión significativamente menor. De acuerdo a la presión del gas alojado en el interior de la lámpara y la tecnología que se utilice para convertir luego la radiación ultravioleta en luz visible, podemos hallar una cantidad enorme de tipos de fuentes luminosas. Las más comunes para el aficionado al acuarismo son:

Fluorescentes de baja presión: La luz es emitida por el efecto de fosforescencia+fluorescencia que se produce por la incidencia de los fotones ultravioletas sobre un material luminiscente. Debido a que es el material utilizado el que determina qué frecuencias de luz serán emitidas, se contamina con distintos tipos de elementos el fósforo en el recubrimiento, para obtener curvas espectrales más eficientes de acuerdo a la aplicación. Algunas de estas lámparas han sido formuladas específicamente para que posean los picos de emisión en zonas muy cercanas a los rangos óptimos de absorción de la clorofila, otros han sido diseñados para obtener la máxima emisión en la zona de sensibilidad del ojo humano y otros se han diseñado para obtener un índice de reproducción de colores excepcional (CRI>98). De estos últimos, y de acuerdo a la tonalidad final de la luz emitida, comercialmente, se los encuentra en variantes cálidas (rojizos), frías (azulados) o luz día (neutrales-verdosos).

Si bien puede verificarse que entre distintas compañías los espectros de los tubos luz-día (por poner un ejemplo) son similares, es importantísimo analizar siempre el espectro de emisión dado por el fabricante del mismo, para verificar si sirve a nuestros propósitos. Las lámparas fluorescentes de baja presión son lámparas económicas, de simple instalación y muy eficientes en los dos aspectos de interés PAR/Watt y lumen/Watt, debido a que generalmente casi no poseen emisión fuera del espectro visible.

En la Ilustración 13 podemos observar las curvas espectrales de tres lámparas fluorescentes distintas, observando cómo varía la distribución de potencia en función de la longitud de onda.

Lámparas de alta presión: Existe una inmensa cantidad de tipos diferentes, inclusive de distintos gases y hasta existen modelos que poseen un filamento incandescente para calentamiento previo del gas. La emisión en el espectro lumínico puede producirse por fosforescencia en la superficie de la lámpara, como en el caso anterior, o puede producirse por la emisión lumínica directa de las impurezas agregadas al gas.

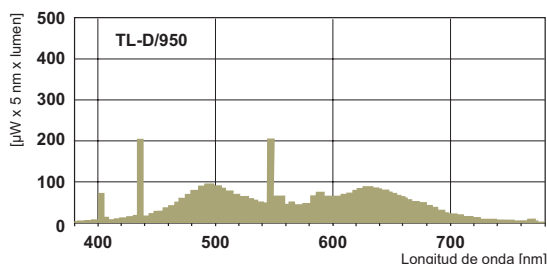
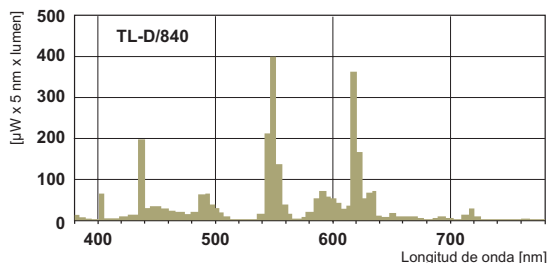
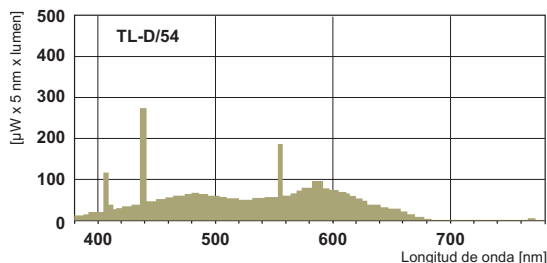


Ilustración 13: Espectros de emisión de tres lámparas fluorescentes habituales. De arriba hacia abajo, Philips TLD/54, TLD/840 y TLD/950.

Es imposible caracterizarlas en una sola explicación, sin entrar en detalles de cada una. Es de recalcar, que en este tipo de lámparas, es más importante aún que en el caso de las anteriores, analizar si el espectro de emisión se adapta a nuestros usos. Salvo los tipos más modernos de lámparas, no suelen tener factores de reproducción de colores elevados, por lo que su elección debe ser cuidadosa si se desea obtener una tonalidad de luz agradable al ojo humano.

Es de vital importancia prestar atención en el reflector utilizado en las lámparas en general. Mientras que en las lámparas de baja presión comúnmente no se utilizan reflectores o están pobremente diseñados, en las de alta presión suele contarse con reflectores sumamente eficientes y correctamente diseñados.

Este hecho, sumado a que la cantidad relativa de PURR emitida por las lámparas de alta presión es

mayor, las hace ideales para su uso en acuarios “profundos” o con columnas de agua superiores a los 50 cm.

En el caso de escoger correctamente las lámparas de baja presión (predominancia de rojos, PURR relativo elevado) y dotarlos de un reflector diseñado específicamente a nuestros fines, es perfectamente posible reemplazar las lámparas de alta presión para su uso en acuarios profundos.

Un efecto secundario que algunos acuaristas aprecian en el caso de las lámparas de alta presión, es que tardan unos minutos en tomar su máximo brillo y esto permite a los peces adaptarse paulatinamente. Los tubos fluorescentes tradicionales tienen un encendido más brusco, pero el efecto puede compensarse o bien iluminando primero con una luz exterior o bien conectándolos en forma diferida mediante el uso de temporizadores.

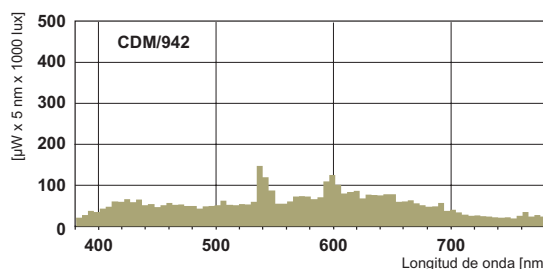
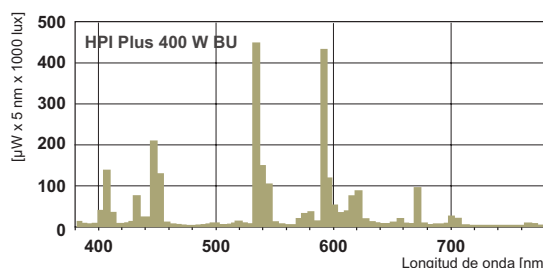
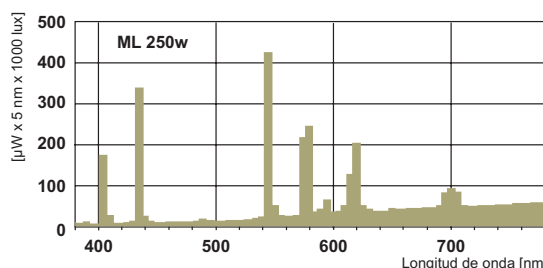


Ilustración 14: Espectros de tres lámparas de mercurio Philips de alta presión de tecnologías diferentes. De arriba hacia abajo, ML 250w, HPI Plus 400w y CDM/942.

Mitos en la elección de fuentes luminosas

Es recién en este punto que ingresamos al tema de nuestro interés, cómo elegir la iluminación del acuario. Existen entre los aficionados muchos prejuicios en detrimento o exceso de determinadas fuentes luminosas, que perturban nuestra decisión a la hora de seleccionar determinado sistema de iluminación y me parece importante eliminarlos antes de continuar.

1) “Los tubos fluorescentes para plantas (tipo Gro-Lux® o similar) iluminan poco”: Esto es absolutamente cierto desde el punto de vista del ojo humano (lumen) ya que distribuyen toda la potencia en emitir luz apta en los picos de fotosíntesis (alto PUR). Es tal vez uno de los casos más notorios junto con las lámparas de sodio, donde la relación PUR/potencia es mucho mayor que la relación lumen/potencia. Son tubos perfectamente aptos y recomendables. Sólo es

necesario compensar la tonalidad violácea de la luz en el caso que el acuario sea de exposición.

2) “Cuanto mayor sea el índice de correlación en grados kelvin mejor”: ¿Mejor para qué? Poco y nada tiene que ver este índice con la eficiencia de fotosíntesis, pero es cierto que tienen mejor penetración en la columna de agua. Desde el punto de vista del ojo humano, cuanto mayor sea este número, por el sólo hecho que las componentes son en general más azuladas y el agua absorbe primero las componentes rojas que las azules.

3) “Hay que usar lámparas de alto CRI para que las plantas crezcan bien”: esto sólo es verdadero si la lámpara tiene un espectro apropiado en el rango de fotosíntesis. Por lo demás un elevado CRI asegura que los colores de los peces se reproducirán en forma bastante similar a los que se hubiesen visto bajo el sol a menos de un metro de profundidad y en aguas perfectamente transparentes con baja carga de ácidos húmicos.

4) “Cuanto más costosa es la lámpara mejor”: nunca el parámetro del costo representa necesariamente una ventaja y sí puede significar una desventaja. Del análisis del espectro de emisión obtenemos si una lámpara es idónea o no para nuestro uso. La tecnología a la que pertenezca no le otorga éxito o fracaso automático.

5) “Las lámparas incandescentes no sirven”: falso, en pequeños acuarios a veces son la única solución y si el acuario es plantado, y se utilizan plantas de poca exigencia lumínica, pueden desarrollarse perfectamente. Por otro lado una lámpara incandescente y una lámpara de mercurio hacen una combinación bastante interesante y de gran poder de penetración.

6) “El espectro solar es plano y por lo tanto se deben usar lámparas de mercurio halogenado que también poseen el espectro plano”: Falso en ambas afirmaciones. Sólo un profundo desconocimiento del tema puede provocar una afirmación así. El espectro solar (Ilustración 1) está bastante lejos de ser “plano”, o suave en el sentido de una lámpara incandescente (Ilustración 11), o una línea horizontal si se representa

la emisión por longitud de onda. Ciertamente el único atributo que se podría utilizar para este tipo de lámparas es el de ‘completo’, en cuanto a la emisión en distintas longitudes de onda. El espectro de las lámparas de mercurio halogenado es más abrupto aún que el solar pero más completo que el de las lámparas fluorescentes estándar.

7) “Las lámparas de mercurio halogenado son más eficientes”: primero que nada habría que compararlas en relación a una lámpara específica y definir los fines para los cuales se las compara. En caso de la iluminación del acuario plantado poseen eficiencias comparables (si no menores) a las lámparas de baja presión de calidad, pero con una relación costo/beneficio mucho menor. Si el objetivo buscado con estas lámparas es aumentar la radiación para fotosíntesis, es más eficiente combinar lámparas de mercurio normal con lámparas de vapor de sodio¹.

8) “Los tubos Gro-Lux[®] fueron diseñados usando algas y por lo tanto aportan más al crecimiento de las algas que de las plantas”: Falso, las algas son vegetales y son bastante similares en cuanto a las necesidades fotosintéticas al resto de las plantas presentes en los acuarios. Es cierto que las algas se adaptan mejor a la calidad pobre de iluminación y algunas poseen pigmentos que les permite asimilar la radiación amarillo-verdosa, pero por lo demás necesitan de la misma calidad de iluminación que una planta superior. Si algo hay que resaltar en el espectro de las lámparas diseñadas para optimizar la fotosíntesis, es que en general se utilizaron plantas terrestres, y por lo tanto carecen de un pequeño exceso de rojo que compensaría las pérdidas en la columna de agua. En caso de tener exceso de algas se debe verificar el resto de los parámetros y su armonía en cuanto a la iluminación, antes de cargar la culpa directamente a la fuente luminosa escogida.

¹ Esta combinación es una práctica habitual en invernaderos donde es necesario ampliar el foto período. En muchos casos inclusive, sólo es necesario utilizar lámparas de sodio, debido a que durante el día se compensa la radiación azul faltante en esta lámpara, con la aportada por la radiación solar.

¿Cómo calcular la radiación necesaria para cada acuario?

Todo este resumen tiene sentido sólo para justificar este último punto. Calcular cuantas lámparas, y de que tipo, debo utilizar en el acuario plantado para asegurar el éxito de las especies que deseo mantener. No hay una sola respuesta a esta pregunta y cada aficionado deberá encontrar la suya. Reglas de X potencia por litro son leyes que pueden funcionar y pueden no hacerlo. Cualquier regla mágica que no tenga en cuenta el tipo de lámpara a utilizar, características del reflector utilizado, dimensiones del acuario, tipo de plantas y régimen a las que se desea mantenerlas, es una regla en principio equivocada.

Puede ser que en determinado rango de dimensiones de acuario, la regla funcione y en otro rango de casos aporte energía en exceso y por lo tanto otorgue un determinado grado de éxito, pero no será de uso general y, lo más importante desde mi punto de vista, no le da al aficionado ningún criterio de

modificación o conocimiento sobre qué se está haciendo. Indicar el nivel de iluminación por cantidad de litros del acuario, es igual que recetar cierta cantidad de fertilizante por volumen sin tener en cuenta todo el resto de parámetros y necesidades. En el anexo 4 se detallan varios casos prácticos que pueden ser utilizados como guías para otros casos particulares.

Calcular la cantidad de $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$ y calidad del espectro de emisión que necesito en un acuario se puede resolver en 6 pasos:

- Averiguar cuantos PAR necesito para las plantas que deseo cultivar y el ritmo de crecimiento que deseo para ellas.
- Fijar a qué profundidad estarán todas las plantas.
- Verificar cuál de todas las combinaciones PAR/profundidad es la más relevante

- d) Con el valor hallado en c, averiguar cuál es el nivel de intensidad necesario en la superficie.
- e) Aplicar la eficiencia de nuestros reflectores, más posibles pérdidas por cubiertas de vidrio del acuario, al valor anteriormente hallado
- f) Elegir qué fuentes luminosas cubren con las expectativas de radiación espectro.

Veremos entonces qué implican cada uno de estos pasos. Antes que nada debemos definir qué tipo de crecimiento deseamos de nuestras plantas. De acuerdo al nivel de intensidad lumínica seleccionado, calcularemos el nivel de radiación¹

- **Nivel de intensidad lumínica mínimo:** apenas arriba del punto de compensación de la fotosíntesis: sólo mantiene vivas las plantas, casi no se produce aumento de la masa corporal de las mismas. La actividad fotosintética se encuentra en su punto mínimo. Es un punto de equilibrio interesante, la planta consume una cantidad mínima de nutrientes y no produce prácticamente crecimiento vegetativo. El volumen de oxígeno producido es mínimo, al igual que el nivel de CO2 necesario. Es realmente difícil que se produzcan casos de infestaciones de algas, pero pueden presentar problemas con las cianobacterias. No es necesario podar las plantas, el acuario permanece prácticamente invariante en el tiempo. El factor limitante suele ser justamente la cantidad de luz.
- **Nivel de intensidad lumínica medio:** entre el punto de compensación y de saturación: las plantas crecen vegetativamente a ritmos similares al promedio en la naturaleza. La necesidad de abonado externo es relativa, si el sustrato está bien constituido, es innecesario el agregado de más nutrientes. El factor limitante es el CO2: si no es aportado en forma externa, las plantas consumen todo el dióxido de carbono producido por los peces, procesos bacterianos y difusión atmosférica. El nivel de oxígeno suele ser apropiado para la cantidad de peces albergada en el acuario. El podado es espaciado pero constante.
- **Nivel de intensidad lumínica máximo:** igual o mayor al punto de saturación: la planta crece en la medida que el abonado se lo permita. El factor limitante es el CO2 o el fertilizado externo, el sustrato no puede sostener el nivel de crecimiento pasados los primeros meses de vida del acuario. El oxígeno se encuentra saturado, si no se agrega suficiente fertilizante de calidad o el CO2 es menor al necesario, puede producirse clorosis y daño en los tejidos. Este tipo de acuarios es difícil de equilibrar, pero el crecimiento rápido de las plantas permite tomar medidas drásticas y corregirlas rápidamente en el tiempo. El podado es continuo y necesario para mantener el equilibrio. En general, es la única manera de mantener en acuarios plantas con alta exigencia luminosa.

¹ Los términos 'puntos de compensación' y de 'saturación' se refieren a qué niveles de radiación son necesarios para mantener la fotosíntesis al mínimo sin pérdidas de reserva para la planta o para saturar las posibilidades fotosintéticas de la misma respectivamente.

Tomando en cuenta el tipo de acuario que uno desea mantener, es necesario elegir uno de estos niveles de iluminación. Realizado esto debe verificarse las necesidades de radiación de las plantas que serán adquiridas, verificando que están de acuerdo con nuestra elección. En general todas las plantas se desarrollan bien en el nivel intermedio, pero algunas necesitan ser mantenidas en algunos de los extremos. Teniendo en cuenta que es muy poca la información que existe sobre el nivel PAR necesario para cada planta, detallo en el Anexo II los datos que he podido recopilar, y que irán incrementándose con el aporte de todos.

Una vez obtenido este valor debemos tener en cuenta que las necesidades de radiación de las plantas suelen estar indicadas en las tablas por unidad de superficie. Si este fuese el caso, deberemos ajustar nuestro valor obtenido. Para ello multiplicaremos el nivel de μmol hallado por la superficie de nuestro acuario. Por ejemplo, si nos indican que las *cryptocorynes* necesitan un nivel de radiación de $45 \mu\text{Mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$, y nuestro acuario tiene como medidas de base $120\text{cm} \times 40\text{cm}$, es decir 0.48 m^2 entonces necesitaremos $22 \mu\text{Mol}\cdot\text{s}^{-1}$ en el fondo de nuestro acuario para cubrir las mismas exigencias.

El siguiente punto es realizar las cuentas para obtener cuantos $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$ necesito en la superficie de mi acuario.

Entiendo por superficie el punto dentro del agua más cercano a la superficie de la misma, es decir, ya penetrada la interfaz aire-agua. Utilizando la ecuación de Beer-Lambert podemos obtener la radiación en la superficie del acuario en función de la deseada a determinada profundidad. Esto sería

$$I_0 = I_z \cdot e^{\epsilon \cdot z}$$

Por simplificación, utilizaremos la Tabla 2 previamente calculada y expresaremos la relación anterior como:

$$I_{\text{superficie}} = \frac{100 \cdot I_{\text{calculada}}}{C\%}$$

donde C% es el porcentaje obtenido de la Tabla 2 para los valores de ϵ y profundidades apropiados.

Ahora sólo resta utilizar el factor de rendimiento de nuestro reflector y tener en cuenta las posibles pérdidas por reflexión en la superficie del vidrio que se utilice como cobertura del acuario. En la sección correspondiente ya hemos analizado este problema y podemos aplicar los coeficientes que correspondan según el caso.

Calculada la cantidad de radiación total, sólo nos falta un detalle para poder seleccionar las lámparas más apropiadas.

En la Tabla 3, se esbozan algunas recomendaciones de relación PURR/PURA según los distintos coeficientes de absorción y profundidades del acuario. Esta tabla está basada en la pérdida de rojos causada por absorción del agua, más un proporcional debido a la incidencia de la clorofila y el material orgánico disuelto.

Utilizando este coeficiente, buscamos las lámparas que en total mejor satisfagan nuestras necesidades. Por ejemplo, si el coeficiente es igual a 1.4 y debemos colocar dos lámparas, podemos utilizar una que ya posea esa relación PURR/PURA o utilizar dos de igual radiación, que posean individualmente una relación 0.9 y 1.9 para que en promedio sigan representando el coeficiente deseado. En el caso que las lámparas a sumar posean individualmente valores PAR diferentes, utilizar un promedio ponderado para obtener el coeficiente resultante.

Cabe aclarar en este punto que existen varios estudios que permiten afirmar que, en algunas especies, las plantas acuáticas han desarrollado pigmentos que

les permiten absorber la radiación ubicada en el rango fotópico. Debido a que no existe un resultado taxativo, general y determinante al respecto, preferiré seguir intentando conservar el balance PURR/PURA que la planta hubiese recibido de la radiación solar en el caso de estar apenas sumergida. Si bien hay evidencia clara que indica que el fitoplancton absorbe más radiación en el extremo azul, resultados de trabajos en laboratorios indicaron un crecimiento foliar mayor en plantas iluminadas con un leve exceso de rojos.

Creo entonces apropiada la utilización de la Tabla 3, sobretodo en acuarios profundos donde se desee mantener plantas acuáticas tipo césped.

	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3
10	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
20	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
30	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.3	1.3	1.3	1.3	1.4	1.4	1.4	1.5	1.5	1.5	1.7	1.7	1.7	1.7	1.8	1.8	1.9	1.9
40	1.1	1.2	1.2	1.2	1.3	1.3	1.4	1.4	1.4	1.5	1.5	1.7	1.7	1.8	1.8	1.9	1.9	2.0	2.0	2.1	2.2	2.2	2.3
50	1.1	1.2	1.2	1.3	1.3	1.4	1.4	1.5	1.5	1.7	1.8	1.8	1.9	2.0	2.0	2.1	2.2	2.3	2.3	2.4	2.5	2.6	2.8
60	1.1	1.2	1.3	1.3	1.4	1.4	1.5	1.7	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.8	2.9	3.0	3.2	3.3
70	1.2	1.2	1.3	1.4	1.4	1.5	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.9	3.0	3.2	3.4	3.5	3.7	4.0
80	1.2	1.2	1.3	1.4	1.5	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.4	2.5	2.6	2.9	3.1	3.3	3.5	3.7	4.0	4.2	4.5	4.8
90	1.2	1.3	1.3	1.4	1.5	1.7	1.9	2.0	2.1	2.3	2.4	2.6	2.8	3.0	3.2	3.5	3.7	4.1	4.3	4.6	5.0	5.4	5.7
100	1.2	1.3	1.4	1.5	1.7	1.8	2.0	2.1	2.3	2.4	2.6	2.9	3.1	3.4	3.6	4.0	4.3	4.6	5.1	5.5	5.9	6.4	6.9

Tabla 3: Coeficientes de multiplicación para hallar la relación PURR/PURA óptima del conjunto de lámparas.

Conclusiones

Se ha presentado el método exacto para calcular con propiedad el nivel de iluminación necesario en un acuario determinado, sin utilizar reglas vagas o de dudoso origen. El aficionado que desea calcular apropiadamente su sistema de iluminación para optimizar el desembolso inicial y el gasto mensual ya posee herramientas para evaluar los distintos aspectos involucrados. Para cada punto se ha explicado brevemente los factores que intervienen en los cálculos y se obtienen del análisis de los mismos cuatro conclusiones importantes.

- a) Los factores más relevantes en el cálculo de la iluminación requerida por un acuario son las necesidades específicas de las distintas especies, el factor de absorción/scattering y la eficiencia del reflector utilizado.
- b) Es necesario presionar a los productores de plantas acuáticas para que comiencen a indicar en sus catálogos consideraciones más exactas en el nivel de iluminación necesario para cada especie. De la misma manera que nos indican el rango de dureza

del agua en forma cuantitativa, debemos exigir que lo hagan con el nivel de iluminación.

- c) Es absolutamente necesario para la completitud de este primer trabajo, realizar un estudio pormenorizado que permita obtener la forma de un reflector ideal para acuarios que minimice las pérdidas por reflexión en la superficie y vidrios laterales.
- d) Es necesario llevar a cabo mediciones del coeficiente de absorción/dispersión en distintos acuarios, para obtener una cuantificación de la calidad óptica del agua de los mismos. Este estudio arrojaría un rango válido, así como también una media, que permita ajustar el cálculo de iluminación a niveles óptimos según los usos y características de nuestro acuario.

En el anexo 4 se presentan ejemplos de cálculos en distintas situaciones que pueden clarificar el uso de las tablas y métodos descriptos en este trabajo.

Néstor Damián Groel
 25 de agosto de 2003
nestor_groel@lorien-sistemas.com

Bibliografía

- <http://www.aquabotanic.com/lightcompare.htm> - Busko Ivo -A Comparison Between Light Sources Used in Planted Aquaria
- http://edl.engr.ucdavis.edu/publications_theses.html - Coker, Jennifer E., 2000. Optical Water Quality of Lake Tahoe. M.S. Theses
- Craig E. Williamson and Donald P. Morris - Dissolved organic carbon and nutrients as regulators of lake ecosystems: Resurrection of a more integrated paradigm - *Limnol. Oceanogr.*, 44(3, part 2), 1999, 795–803
- Deflandre Bruno and Jean-Pierre Gagne - Estimation of dissolved organic carbon (DOC) concentrations in nanoliter samples using uv spectroscopy - *Wat. Res.* vol. 35, no. 13, pp. 3057–3062, 2001
- Goins Gregory D. - Performance of salad-type plants grown under narrow spectrum light-emitting diodes in a controlled environment - Dynamac Corporation, Kennedy Space Center, Florida 32899
- Hawes Ian et. al. - UV transparency in NZ lakes and the impact of UV on freshwater zooplankton and benthic plants
- Jackson J.D. – *Classical Electrodynamics* – Wiley Second Edition
- Kirk John T. O. - The vertical attenuation of irradiance as a function of the optical properties of the water - *Limnol. Oceanogr.*, 48(1), 2003, 9–17
- Leavitt Peter R., Rolf D. Vinebrooke, David B. Donald, Smol John P. & David W. Schindler - Past ultraviolet radiation environments in lakes derived from fossil pigments - *Nature* vol 388 pp.457-459 - 31 July 1997
- Losada Joaquim Pérez - A Deterministic Model for Lake Clarity; Application to Management of Lake Tahoe, (California-Nevada), USA - Doctoral Theses - Universitat de Girona - July 2001
- Modenutti Beatriz , Gonzalo Pérez, Esteban Balseiro and Claudia Queimaliños - The relationship between light attenuation, chlorophyll a and total suspended solids in a Southern Andes glacial lake - *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 27 1–4 Stuttgart, December 2000
- OSRAM SYLVANIA - FAQ0017-0800 - Photosynthetically Active Radiation (PAR) Units
- Patterson Karen Whitney - Contribution of chromophoric dissolved organic matter to attenuation of ultraviolet radiation in three contrasting coastal areas - Doctoral Theses - UNIVERSITY OF CALIFORNIA – March 2000
- Pérez Gonzalo L., Queimaliños Claudia P. and Modenutti Beatriz E. - Light climate and plankton in the deep chlorophyll maxima in North Patagonian Andes Lakes - *Journal of Plankton Reserch* - Volume 24, Number 6, pp. 591-599, 2002
- Photosynthesis 2002 <http://ps-hlambers.agric.uwa.edu.au/Photosynthesis/Photosynthesis2002.pdf>
- Ramírez, J. J. and Bicudo, C. E. M.- Nictemeral changes in a tropical shallow reservoir variation of climatic and physical co-determinants of phytoplankton community in four nictemeral sampling days in a shallow tropical reservoir, southeastern Brazil - *Braz. J. Biol.*, 62(1): 1-14, 2002
- Schwarz Jill N. et al - Two models for absorption by coloured dissolved organic matter (CDOM) - *OCEANOLOGIA*, 44 (2), 2002.pp. 209–241. 2002
- Smith R.E.H. , J.A. Furgal, M.N. Charlton, B.M. Greenberg, V. Hiriart, and C. Marwood - Attenuation of ultraviolet radiation in a large lake with low dissolved organic matter concentrations - *Can. J. Fish Aquat. Sci.* 56: 1351–1361 (1999)
- Sørensen, K., Høkedal, J. , Aas, E., Doerffer, R., Dahl, E. - Early results for validation of meris water products in the skagerrak
- http://www.venturelighting.com/WhatsNew/lighting_for_plant_growth.htm - Sri Rahm - Lighting for plant growth:Watts, Lumens, Photons and Lux
- Tilstone G.H., Martinez Vicente. V., Sørensen K., Röttgers R., Høkedal J. - An inter-comparison of coloured dissolved organic material and phytoplankton absorption coefficients: implications for meris data validation.
- Vadim N. Pelevin Vera V. Rostovtseva P. P. Shirshov - Parameterization of light scattering for solving the inverse problem of determining the concentrations of the principal light scattering and absorbing admixtures in shelf waters - *OCEANOLOGIA*, 43 (4), 2001.pp. 479–485.2001, by Institute of Oceanology PAS.
- <http://wow.nrri.umn.edu/wow/under/primer/page4.html> - Water on the web - understanding - lake ecology
- Witt Annemette Vestergaard - Low photoinhibition among submerged macrophytes - Department of Plant Ecology, University of Aarhus, Risskov, Denmark
- Yacobi Yosef Z., James J. Alberts, Monika Takacs and Michelle McElvaine - Absorption spectroscopy of colored dissolved organic carbon in Georgia (USA) rivers: the impact of molecular size distribution - *J. Limnol.*, 62(1): 41-46, 2003
- Yavorski M. Detlaf A.A. – *Manual de Física* – Ediciones Cientec

Hojas de datos de fabricantes de lámparas

<http://www.ge.com/en/product/home/lighting.htm> Entrada al catalogo General Electric

<http://www.osram.com.mx> Página principal Osram-Sylvania

<http://pc.lamping.info/pc01/ESindex.html> Índice al Catálogo Philips en español

<http://www.fb.u-tokai.ac.jp/WWW/hoshi/env/light.html> Conversor Lux-PAR para varios tipos de lámparas

Anexo I: Lista de factores de conversión Lumen – PAR

Osram - Sylvania: FAQ0017-0800 - Photosynthetically Active Radiation (PAR) Units
 Multiplicar lm/m² (lux) por la constante abajo detallada para obtener $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$

Lámpara	400-700 nm
Incandescente (3000 K)	0.019
Sodio de alta presión	0.012
Mercurio:	
Transparente	0.011
Recubierta de fósforo	0.013
Haluro metálico	0.014
Fluorescente:	
Blanco Frío	0.013
Luz Día	0.014
"Design 50"	0.016
Series 730, 735, 741, 830, 835	0.013
Series 841, 850	0.013
Series GRO	0.029
Series GRO/WS	0.019
CWX, DX	0.016
Día despejado (sol y cielo, 6000 K)	0.018
Cielo sin sol (12,000 K)	0.020

The Krib: extracto de mensajes

PAR conversions by Petemohan@aol.com Date: Sun, 18 Oct 1998

Factores para multiplicar la lectura en LUX y obtener PAR

Lámpara	400-700nm
Luz del sol	0.02000
Lámparas de haluros metálicos	
AB 150w 6,800 K	0.02000
Coralife 175w 10,000K	0.02128
Coralife 175w 20,000K	0.02128
Coralife 250w 10,000K	0.01887
Coralife 400w 10,000K	0.02041
Hamilton 175w "True 10K"	0.01852
Iwasaki 400w "Daylight"	0.01754
Osram 150w 5,600K	0.01818
Radium 400w "Blue"	0.02083
Lámparas Fluorescentes	
Hamilton Compactas (4x55w, 2 luz día / 2 Actínicos)	0.02000
Sylvania (4x96w, 2 luz día / 2 actínicos)	0.01852
URI VHO (4x110w, 2 luz día / 2 actínicos)	0.02083

Is this enough light? by "Michael Dubinovsky" <mikluha@ix.netcom.com> Date: Tue, 1 Feb 2000

Datos de Gerald Deitzer, University of Maryland

Para la mayoría de las lámparas, multiplicar la emisión en PAR por 0.2-0.22 para obtener la potencia radiada como $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$.

Para obtener LUX multiplicar la emisión en PAR por:

Sol	55.2
Lámpara Incandescente	49.0
Blanco Frío	78.8
Vita-Lite	62.8
Gro-Lux	37.0
Gro-Lux Wide Spectrum	55.1
HPS	83.3
Lámpara MH	74.5

Anexo II – Requerimientos lumínicos para distintas plantas acuáticas.

Lamentablemente, la poca información sobre niveles de iluminación de plantas acuáticas que está disponible para los aficionados es subjetiva o está medida en LUX. A pesar que claramente dejé expresado en este trabajo porqué el LUX no es una medida de iluminación apta para los vegetales, cuando las mediciones fueron realizadas bajo luz solar, puede relacionarse estas mediciones con el valor PAR en forma sencilla. Siendo el espectro de la radiación solar un dato conocido con certeza en casi todo el planeta, puede relacionarse los rangos LUX indicados para las plantas acuáticas con el valor PAR simplemente multiplicando el primero por un factor 0.019. Las plantas acuáticas, aún las que crecen a plena luz del sol, son consideradas como plantas de ‘sombra’. Varios estudios demuestran que los órganos fotosintéticos de las hojas, poseen las mismas adaptaciones encontradas en las plantas terrestres que viven a la sombra de otras.

En todos los catálogos de plantas acuáticas, o libros especializados, pueden observarse requisitos de iluminación para las plantas acuáticas que podrían resumirse en el siguiente cuadro:

Requisitos de iluminación	PAR [$\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$]		
	Mínimo	Media	Máximo
Bajo	2	8	12
Medio	12	20	35
Alto	35	65	80
Muy Alto	80	130	160

Los valores estimativos en PAR para cada uno de los rangos fueron obtenidos de la recolección de una cantidad importante de fuentes bibliográficas e internet.

Es interesante destacar que en la literatura sobre cultivo in-vitro de plantas acuáticas, generalmente se utiliza un nivel de iluminación de 45-50 $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ y en raras ocasiones se utilizan valores que superan los 150 $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$. La práctica demuestra que 50 $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ puede considerarse un nivel apropiado para la mayoría de las plantas acuáticas produciendo un crecimiento vigoroso mas no excesivo.

Todas las plantas acuáticas poseen una capacidad enorme de adaptación a distintos niveles de radiación y es tal vez el genero cryptocoryne el más documentado en este aspecto. Varios autores midieron niveles de radiación absolutamente dispares equivalentes a 1500 $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ y 12 $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ en poblaciones de la misma especie separadas, a veces, apenas cientos de metros. Algunos trabajos científicos muestran indicios que las plantas acuáticas no sufrirían los efectos de foto-inhibición registrados en plantas terrestres, por lo que un nivel de radiación excesivo parecería no causar en general daños de importancia o inhibiciones al proceso fotosintético. Debe tenerse en cuenta que varias plantas con coloraciones rojizas en sus hojas y tallos necesitan niveles elevados, cercanos a los 130 PAR, para mantener esta tonalidad¹.

A continuación se detalla en la tabla algunas especies de plantas acuáticas y sus requisitos de iluminación (casillas negras); **B**ajo, **m**Edio, **A**lto y **M**uy alto. Los datos para confeccionar esta tabla fueron extraídos principalmente del catalogo de Tropica Aquarium Plants y completados con otras fuentes en algunos casos.

¹ Generalmente también es necesario un generoso abonado con CO₂ para mantenerlo.

Nombre científico	B	E	A	M
Alternanthera reineckii "lilacina"				
Alternanthera reineckii "roseaefolia"				
Anubias barteri "coffeefolia"				
Anubias barteri var. angustifolia ("afzelii")				
Anubias barteri var. barteri				
Anubias barteri var. caladiifolia "1705"				
Anubias barteri var. nana				
Anubias heterophylla				
Aponogeton boivinianus				
Aponogeton crispus				
Aponogeton longiplumulosus				
Aponogeton madagascariensis				
Aponogeton rigidifolius				
Aponogeton ulvaceus				
Azolla caroliniana				
Bacopa caroliniana				
Bacopa monnieri				
Barclaya longifolia				
Blyxa japonica				
Bolbitis heudelotii				

Nombre científico	B	E	A	M
Cabomba caroliniana				
Cabomba furcata				
Cardamine lyrata				
Ceratophyllum demersum				
Ceratopteris cornuta				
Ceratopteris thalictroides				
Crinum calamistratum				
Crinum natans				
Crinum thaianum				
Cryptocoryne albida				
Cryptocoryne beckettii				
Cryptocoryne beckettii "petchii"				
Cryptocoryne crispatula var. balansae				
Cryptocoryne parva				
Cryptocoryne pontederiifolia				
Cryptocoryne undulata				
Cryptocoryne undulata "broad leaves"				
Cryptocoryne walkeri (lutea)				
Cryptocoryne wendtii "brown"				
Cryptocoryne wendtii "green"				

Nombre científico	B	E	A	M
Cryptocoryne wendtii 'Mi Oya'				
Cryptocoryne wendtii 'Tropica'				
Cryptocoryne x willisii				
Cryptocoryne x willisii "lucens"				
Cyperus alternifolius				
Cyperus helferi				
Didiplis diandra				
Echinodorus "peruensis"				
Echinodorus bleheri				
Echinodorus cordifolius "Ovalis"				
Echinodorus cordifolius 'Tropica Marble Queen'				
Echinodorus grandiflorus				
Echinodorus grandiflorus ssp. aureus				
Echinodorus macrophyllus				
Echinodorus martii (maior)				
Echinodorus 'Oriental'				
Echinodorus osiris				
Echinodorus 'Ozelot'				
Echinodorus 'Ozelot' green				
Echinodorus palaefolius var. latifolius				
Echinodorus parviflorus 'Tropica'				
Echinodorus quadricostatus "magdalenensis"				
Echinodorus 'Rose'				
Echinodorus 'Rubin'				
Echinodorus 'Rubin' narrow leaves				
Echinodorus schlueteri				
Echinodorus schlueteri 'Leopard'				
Echinodorus subalatus				
Echinodorus tenellus				
Echinodorus uruguayensis				
Echinodorus x barthii				
Egeria densa				
Eichhornia crassipes				
Eichhornia diversifolia				
Eleocharis acicularis				
Eusteralis stellata				
Glossostigma elatinoides				
Gymnocoronis spilanthoides				
Hemianthus callitrichoides				
Hemianthus micranthemoides				
Hemigraphis colorata				
Hemigraphis spec.				
Heteranthera zosterifolia				
Hottonia palustris				
Hydrocotyle leucocephala				
Hydrocotyle sibthorpioides (maritima)				
Hydrocotyle verticillata				
Hygrophila corymbosa "angustifolia"				
Hygrophila corymbosa "Aroma"				
Hygrophila corymbosa "Siamensis 53B"				
Hygrophila corymbosa "Siamensis"				
Hygrophila corymbosa "Stricta"				
Hygrophila difformis				
Hygrophila guianensis				
Hygrophila polysperma				
Hygrophila polysperma 'big leaf'				
Hygrophila polysperma 'Rosanervig'				

Nombre científico	B	E	A	M
Hygroryza aristata				
Lilaeopsis brasiliensis				
Lilaeopsis mauritiana				
Lilaeopsis novae-zealandiae				
Limnophila laevigatum				
Limnophila aquatica				
Limnophila sessiliflora				
Limnophila aromatica				
Lobelia cardinalis				
Ludwigia arcuata				
Ludwigia glandulosa ("perennis")				
Ludwigia helminthorrhiza				
Ludwigia inclinata				
Ludwigia repens				
Ludwigia spec. "Cuba"				
Lysimachia nummularia 'Aurea'				
Micranthemum umbrosum				
Microsorium pt. "Philippine"				
Microsorium pteropus				
Microsorium pteropus 'Tropica'				
Microsorium pteropus 'Windelov'				
Monoselenium tenerum (Pellia endiviaefolia)				
Myriophyllum aquaticum (green)				
Myriophyllum tuberculatum (red)				
Nesaea crassicaulis				
Nuphar japonica				
Nymphaea lotus (zenkeri)				
Nymphaea pubescens				
Ophiopogon japonicus 'Kyoto Dwarf'				
Ottelia ulvifolia				
Phyllanthus fluitans				
Pistia stratiotes				
Polygonum spec.				
Proserpinaca palustris				
Ranunculus limosella				
Riccia fluitans				
Riccia species "Dwarf"				
Rotala macrandra				
Rotala rotundifolia				
Rotala spec. "Nanjenshan" (Mayaca sellowiana)				
Rotala spec. 'Green'				
Rotala wallichii				
Sagittaria platyphylla				
Sagittaria subulata				
Salvinia cucullata				
Salvinia natans				
Samolus valerandi				
Saururus cernuus				
Shinnersia rivularis				
Spathiphyllum wallisii				
Vallisneria americana (gigantea)				
Vallisneria americana (natans)				
Vallisneria americana var. biwaensis				
Vallisneria spiralis "Tiger"				
Vesicularia dubyana				
Zosterella dubia				

Anexo III – Información resumida de distintas fuentes luminosas

Extractada del trabajo original de Ivo Busko

“A comparison Between Light Sources used in Planted Aquarium”

Lámpara	Watt	Lumen			PAR [$\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$]		PUR [$\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$]			
		Teóricos	Medido	Eficacia		Eficacia	Total	Azul	Rojo	R/A
ADV850	32	9,700	3,100	0.32	46.20	1.4400	22.80	11.50	7.20	0.63
HPS Dlx	100	22,650	7,300	0.32	140.00	1.4000	72.80	10.10	53.80	5.33
MHN	150	34,500	11,250	0.33	207.00	1.3800	116.00	45.00	47.70	1.06
Iwasaki65	150	37,700	12,000	0.32	199.00	1.3300	107.00	46.60	35.20	0.75
Optimarc	250	59,030	19,000	0.32	330.00	1.3200	181.00	75.00	70.00	0.93
Dulux54	55	16,400	4,800	0.29	72.20	1.3100	36.30	19.60	10.30	0.52
Pentron41 HO	54	17,800	5,000	0.28	69.50	1.2900	32.00	13.70	12.00	0.88
Aquarelle	38	8,100	2,380	0.29	48.20	1.2700	29.10	18.80	6.90	0.37
T8/741	32	10,400	2,850	0.27	40.40	1.2600	18.90	7.50	7.30	0.97
MH	250	82,500	23,000	0.28	310.00	1.2500	152.00	67.60	32.20	0.48
PC6700	96	29,100	8,100	0.28	117.00	1.2200	56.10	27.00	16.70	0.62
TLD950	36	9,100	2,350	0.26	42.80	1.1900	23.40	8.50	10.00	1.18
GE SPX65	40	11,600	3,050	0.26	46.20	1.1500	24.00	13.80	5.10	0.37
PLL950	55	14,800	3,800	0.26	62.80	1.1400	32.80	15.50	10.70	0.69
PC6700	55	16,700	4,230	0.25	61.00	1.1100	29.30	14.10	8.70	0.62
Triton	40	9,000	2,200	0.24	43.20	1.0800	25.10	14.90	7.20	0.48
Daylight Dlx	40	10,400	2,550	0.25	42.30	1.0600	23.20	11.90	6.20	0.52
GE Fresh & Salt	40	10,000	2,350	0.24	42.60	1.0600	23.20	12.40	7.60	0.62
Cool White	40	12,600	3,050	0.24	42.40	1.0600	20.50	9.30	5.70	0.61
VitaLite	40	9,200	2,340	0.25	41.50	1.0400	23.10	10.00	8.30	0.82
Ott CF	23	5,000	1,200	0.24	24.00	1.0400	14.40	7.50	4.60	0.61
Gro-Lux	40	5,100	1,200	0.23	41.20	1.0300	27.40	9.70	15.50	1.60
Warm White	40	14,000	3,100	0.22	40.70	1.0200	18.10	6.10	6.60	1.08
Cool White Dlx	40	9,500	2,250	0.24	40.50	1.0100	22.40	8.60	9.40	1.09
Warm White Dlx	40	9,400	2,200	0.23	39.80	1.0000	21.40	5.90	11.60	1.97
Perfecto	40	6,800	1,500	0.22	39.50	0.9890	25.30	9.80	12.60	1.28
C50	40	10,100	2,250	0.22	39.20	0.9800	21.20	8.10	8.80	1.09
Osram Biolux	40	10,200	2,400	0.24	38.10	0.9530	20.40	10.20	4.50	0.44
P&A	40	8,900	1,900	0.21	37.70	0.9430	20.90	5.40	12.00	2.22
VHO Cool White	115	36,000	7,500	0.21	105.00	0.9160	51.40	23.00	14.20	0.62
AgroLite	40	7,800	1,600	0.21	33.60	0.8410	19.20	5.40	11.10	2.05
GE Freshwater	40	8,500	1,425	0.17	30.80	0.7710	18.40	6.90	9.10	1.33
TL950	32	13,000	2,000	0.15	22.70	0.7090	8.90	2.00	2.40	1.19
MV	100	42,300	4,300	0.1	46.20	0.4600	17.80	7.10	4.30	0.60
Wonderlite	160	31,500	3,125	0.1	56.90	0.3560	32.10	14.30	10.30	0.72
PowerGlo	40	8,900	2,200	0.25	43.20	1.0800	25.70	14.90	5.80	0.39
SunGlo	40	13,100	3,100	0.24	42.40	1.0600	20.60	9.70	4.80	0.49
AquaGlo	40	4,600	960	0.21	38.50	0.9640	27.90	11.50	14.60	1.27
FloraGlo	40	12,100	2,180	0.18	34.30	0.8570	16.70	3.40	9.20	2.69
Halogen	60	1,100	730	0.65	15.80	0.2630	8.70	1.20	6.10	4.69
Luz Solar	40	8,040	2,050	0.25	40.00	1.0000	22.80	8.90	10.00	1.08

Nota: No he verificado la veracidad de ninguno de los datos calculados en esta tabla por el autor.

Referencias:

ADV850: Fluorescente Philips Advantage, 5000K F32T8/ADV850

AgroLite: Fluorescente Philips Agro-Lite F40T12AGRO

Aquaglo: Fluorescente Hagen (copia del Gro-Lux WS)

Aquarelle: Fluorescente Philips Aquarelle 10,000 K (para acuarios de agua dulce)

C50: Fluorescente T12 5000K GE Sunshine

Cool White: Fluorescente genérico 4100 K CoolWhite F40T12CW (promedio)

Cool White Dlx.: Fluorescente genérico 4200 K blanco frío F40T12CWX (promedio)

Daylight Dlx: Fluorescente GE Luz Día de lujo

Dulux54: Fluorescente compacta Osram Dulux L 5400K 82 CRI

FloraGlo: Fluorescente Hagen

GE Fresh & SALT: Fluorescente para acuarios GE AquaRays (F40T12/AR/FS)
GE Freshwater: Fluorescente GE AquaRays para agua dulce (F40T12/AR/FR)
GE SPX65: Fluorescente GE SPX65 6500 K
Gro-Lux: Fluorescente Sylvania Gro-Lux "Original"
Halogen: Halógena Philips Masterline Par 16 (60PAR16/H/NSP) 2950K
HPS Dlx: Sodio de alta presión Philips Ceramlux Comfort C100S54/C/M
Iwasaki65: Haluro metálico Iwasaki 6500K
MH: Haluro metálico genérico 4000K CRI65 (catalogo Philips)
MHN: Haluro Metálico Philips 4100K CRI 80 (MHN150/TD/840)
MV: Vapor de Mercurio de lujo Philips H38MP-100/DX 3700 K, CRI 45
Optimarc: Haluro metálico Duro-Test 250 Watt 5500 K (CRI = 91)
Osram Biolux: Fluorescente Osram Biolux
Ott CF: Fluorescente compacto con balasto electrónico incorporado genérico
P&A: Fluorescente para acuarios GE
PC6700: Fluorescente compacta 6700K 96 Watt PC96W67K
PC6700: Fluorescente compacto 6700K 55 Watt PC55W67K
Pentron41 HO: Fluorescente Osram/Sylvania T5 HO 4100 K (FP54/841/HO)
Perfecto: Fluorescente grolux de amplio espectro Perfecto-A-Lamp
PLL950: Fluorescente compacto Philips PL-L/950 5300K - CRI=91
PowerGlo: Fluorescente Hagen
Sun light: Lámpara teórica que reproduzca perfectamente la luz solar (CIE-D 5500 K)
SunGlo: Fluorescente Hagen
T8/741: Lámpara genérica CoolWhite, 4100 K, F32T8/741
TL950: Fluorescente Philips TL950 5000K CRI=98 F32T8/TL950
TLD950: Fluorescente Philips Serie 'TL'D/905300 K CRI > 95
Triton: Fluorescente Interpet Triton
VHO Cool White: Fluorescente de alta emisión 4100 K blanco frío (Osram F48T12CW/VHO/LT)
VitaLite: Fluorescente Duro-test VitaLite CRI = 91
Warm White: Fluorescente genérico 3000 K blanco calido F40T12W (promedio)
Warm White Dlx.: Fluorescente compacto genérico 3000 K blanco cálido F40T12WX (promedio)
Wonderlite: vapor de Mercurio con balasto incorporado especial para plantas

Anexo IV – Algunos cálculos de acuarios específicos.

En este anexo propondremos algunos acuarios característicos, definiremos qué especies serán mantenidas en los mismos y calcularemos las lámparas mas apropiadas. En todos los casos se asume un reflector con un coeficiente de eficiencia de 0.8 (incluyendo la pérdida por reflexión en la interfaz), el acuario no posee tapa de cristal (entre las lámparas y la superficie del agua) y qué la altura máxima de la columna de agua es igual a la altura del acuario menos 10 cm. (7 cm. por el sustrato y 3 cm. de borde superior). Dimensiones del tanque como frente x profundidad x altura en cm. y capacidad del mismo entre paréntesis. Asumiré que el coeficiente de absorción es igual a 1.2 m^{-1} (promedio del mínimo y máximo estimados en este trabajo) pero esto deberá ser verificado empíricamente.

Caso 1

Tanque: 90x45x45(180)

Plantas: sagittaria subulata en el fondo junta a glossostigma elatinoides, riccia fluitans a 10 cm. bajo la superficie. Otras plantas de requerimientos menores. De las tres plantas críticas, la más crítica es la glossostigma elatinoides que tiene un requisito alto a muy alto (igual que la riccia) pero está ubicada en el fondo.

Cálculo: Estimo necesitar entonces $130 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ a nivel del sustrato. Calcularé todo para 40 cm. de columna de agua ya que las tablas de este trabajo no tienen especificados resultados para 35 cm. Debido a que este acuario tiene una superficie de 0.4 m^2 , necesito en realidad $52 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$. Aplicando la relación con el índice de la Tabla 2 para $\epsilon=1.2 \text{ m}^{-1}$ obtengo que en la superficie necesito $85 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$. Si divido por eficiencia del reflector, obtengo que en total son necesarios...

Resultado: $105 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$

Factor PURR/PURA sugerido: 1.55 (calculado para 35 cm. de columna de agua, promedio de la tabla 1.4-1.7)

Lámparas: Por el largo del acuario decido usar lámparas compactas como primera opción y tubos de 30 watt como segunda opción.

Opción A) Lámparas compactas serie PLL. Según la tabla del Anexo 3, necesitaría mezclar en cantidades iguales lámparas Warm White dlx y Cool White dlx, para obtener una relación PURR/PURA como la esperada. Debido a que las PLL-800 no se encuentran en la tabla de Ivo Busco, aplico el coeficiente de conversión provisto por Sylvania del Anexo 1 y obtengo que son necesarios aproximadamente 8,000 lumen ($105 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}/0.013$). Esto es equivalente a utilizar 4 lámparas compactas PLL, 2 de 36 watt y 2 de 18. El conjunto final queda distribuido entonces como 1 PLL-83/36 + 1 PLL-84/36 + 1 PLL-83/18 + 1 PLL-84/18.

Potencia Total: 108 watt

Opción B) 6 tubos fluorescentes de 18 watt. 3 Serie 840 y 3 serie 830.

Potencia Total: 108 watt

Caso 2

Tanque: 90x45x45(180)

Plantas: vallisneria spirallis, marsilea crenata, anubias barteri var. nana y vesicularia dubyana en el sustrato; lemna minor en la superficie. Este acuario será utilizado para mantenimiento de carassius aureatus. En realidad este es un caso muy interesante. La lemna y la vallisneria serán calculadas con el nivel de iluminación en la superficie, el resto son plantas que requieran poca luz, pero utilizaré el requisito medio-máximo para compensar que gran parte de la superficie del acuario estará cubierto de plantas flotantes. Debido a que es un acuario para carassius, asumiré además que el agua a pesar del filtrado estará algo turbia, por lo que en este caso asumiré $\epsilon=2 \text{ m}^{-1}$.

Cálculo: Estimo necesitar entonces $35 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ a nivel del sustrato. Debido a que este acuario tiene una superficie de 0.4 m^2 , necesito en realidad $14 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$. Aplicando la relación con el índice de la Tabla 2 para $\epsilon=2 \text{ m}^{-1}$ obtengo que en la superficie necesito $31 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$. Si divido por eficiencia del reflector, obtengo que en total son necesarios...

Resultado: $38 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$

Factor PURR/PURA sugerido: en realidad es irrelevante debido a que las plantas en la superficie no sufren alteración por rojos y las otras plantas son para baja iluminación, por lo que en general son plantas adaptadas a la falta de ellos.

Lámparas: Por el largo del acuario decido usar lámparas compactas como primera opción y tubos de 18 watt como segunda opción.

Opción A) Lámparas compactas serie PLL. Debido a que esta serie no se encuentran en la tabla de Ivo Busco, aplico el coeficiente de conversión provisto por Sylvania del Anexo 1 y obtengo que son necesarios aproximadamente 3,000 lumen ($38 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}/0.013$). Esto es equivalente a utilizar 1 lámpara compacta PLL de 36 Watt, serie 830 preferentemente

Potencia Total: 36 watt

Opción B) 2 tubos fluorescentes de 18 watt. 1 Serie 840 y 1 serie 830.

Potencia Total: 36 watt

Caso 3

Tanque: 120x45x45(240)

Plantas: algunas sagittaria subulata en el fondo (sólo plantas aisladas) junto a marsilea crenata, un tronco fuertemente poblado de microsorum pteropus y anubias barteri var. nana. Ninguna de estas plantas es de requisitos mayores al medio. Decido utilizar el medio-máximo para estimular el crecimiento de las anubias y microsorum, pero no mayor a este valor para que la marsilea pueda competir con la sagittaria, caso contrario esta última cubriría el fondo del acuario.

Cálculo: Estimo necesitar entonces $35 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ a nivel del sustrato. Debido a que este acuario tiene una superficie de 0.5 m^2 , necesito en realidad $17 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$. Aplicando la relación con el índice de la Tabla 2 para $\epsilon=1.2 \text{ m}^{-1}$ obtengo que en la superficie necesito $27 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$. Si divido por eficiencia del reflector, obtengo que en total son necesarios...

Resultado: $34 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$

Factor PURR/PURA sugerido: 1.55, en este caso de todas maneras no es crítico porque las plantas en el sustrato están adaptadas en la naturaleza a condiciones de baja iluminación.

Lámparas: Por el largo del acuario decido usar tubos fluorescentes de 40 Watt. Utilizo un tubo Gro-Lux debido a que tiene la relación de PURR/PURA exacta y la cantidad PAR necesaria. Si la cantidad de iluminación al ojo humano resultase ser demasiado pobre o la tonalidad no satisfactoria, reemplazar por un tubo serie TLD/827, TLD/830 u TLD/840.

Potencia Total: 40 Watt

Caso 4

Tanque: 120x45x45(240)

Plantas: glossostigma elatinoides y eleocharis acicularis en el fondo, microsorum pteropus y bolbitis heudelotti en un tronco a media agua. Claramente las plantas del fondo necesitan de una buena iluminación. Los valores apropiados estarían entre el alto y muy alto. Elijo el muy alto.

Cálculo: Estimo necesitar entonces $130 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ a nivel del sustrato. Debido a que este acuario tiene una superficie de 0.5 m^2 , necesito en realidad $65 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$. Aplicando la relación con el índice de la Tabla 2 para $\epsilon=1.2 \text{ m}^{-1}$ obtengo que en la superficie necesito $105 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$. Si divido por eficiencia del reflector, obtengo que en total son necesarios...

Resultado: $130 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$

Factor PURR/PURA sugerido: 1.55.

Lámparas: Por el largo del acuario decido usar tubos fluorescentes de 40 Watt. Utilizo dos tubos TLD/950 + un tubo TLD/830 (u TLD/827 si se considera que hay faltante de rojos).

Potencia Total: 120 Watt.

Caso 5

Tanque: 120x45x60(351)

Plantas: igual que el anterior mas algunos aponogeton sp. de requerimiento de iluminación alto.

Cálculo: Estimo necesitar entonces $130 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ a nivel del sustrato. Debido a que este acuario tiene una superficie de 0.5 m^2 , necesito en realidad $65 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$. Aplicando la relación con el índice de la Tabla 2 para $\epsilon=1.2 \text{ m}^{-1}$ obtengo que en la superficie necesito $120 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$. Si divido por eficiencia del reflector, obtengo que en total son necesarios...

Resultado: $150 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$

Factor PURR/PURA sugerido: 1.8.

Lámparas: Por el largo del acuario decido usar tubos fluorescentes de 40 Watt. Utilizo dos tubos TLD/950 + dos tubos TLD/827.

Potencia Total: 160 Watt.

Caso 6

Tanque: 150x50x70(525)

Plantas: igual que el anterior.

Cálculo: Estimo necesitar entonces $130 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ a nivel del sustrato. Debido a que este acuario tiene una superficie de 0.75 m^2 , necesito en realidad $98 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$. Aplicando la relación con el índice de la Tabla 2 para $\epsilon=1.2 \text{ m}^{-1}$ obtengo que en la superficie necesito $196 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$. Si divido por eficiencia del reflector, obtengo que en total son necesarios...

Resultado: $245 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$

Factor PURR/PURA sugerido: 2.0.

Lámparas: Este acuario es recomendable iluminarlo con lámparas HQI (cuidar la relación PURR/PURA) o, si se cuenta con excelentes reflectores, 6 lámparas fluorescentes PLL-830 de 36 Watt.

Potencia Total: con las PLL 215 watt y 200 watt con HQI .

Caso 7

Tanque: 60x40x40(96)

Plantas: *eleocharis acicularis* en el sustrato. Nivel de iluminación muy alto como máximo.

Cálculo: Estimo necesitar entonces $130 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ a nivel del sustrato. Debido a que este acuario tiene una superficie de 0.25 m^2 , necesito en realidad $33 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$. Aplicando la relación con el índice de la Tabla 2 para $\varepsilon=1.2 \text{ m}^{-1}$ obtengo que en la superficie necesito $47 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$. Si divido por eficiencia del reflector, obtengo que en total son necesarios...

Resultado: $60 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$

Factor PURR/PURA sugerido: 1.4.

Lámparas: Por el largo del acuario decido usar 3 tubos fluorescentes de 18 Watt o 2 lámparas compactas PLL, una de 36 watt y otra de 24 watt. En cualquiera de los casos, una de las lámparas debe ser series TLD/827, el resto según el gusto del propietario.

Potencia Total: 60 Watt.

Nota: si se hubiese elegido el nivel de iluminación alto en lugar de muy alto, hubiese sido necesaria sólo la mitad de potencia.

Caso 8

Tanque: 30x30x30(27)

Plantas: *marsilea crenata* como césped, algunas *cryptocorynes* y una planta importante de anubias en un tronco con *vesicularia dubyana*. Ninguna planta es crítica, puedo elegir niveles bajos de iluminación pero elijo medio para tener un buen desarrollo de la *marsilea*.

Cálculo: Estimo necesitar entonces $20 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ a nivel del sustrato. Debido a que este acuario tiene una superficie de 0.09 m^2 , necesito en realidad $2 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$. Aplicando la relación con el índice de la Tabla 2 para $\varepsilon=1.2 \text{ m}^{-1}$ obtengo que en la superficie necesito $2.5 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$. Si divido por eficiencia del reflector, obtengo que en total son necesarios...

Resultado: $3 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$

Factor PURR/PURA sugerido: 1.3.

Lámparas: Utilizo casi cualquier lámpara compacta de 5 Watt. En particular sería cómodo utilizar en este caso las lámparas fluorescentes integradas con reflector incluido y armarlo como acuario abierto.

Potencia Total: 5 Watt.

Caso 9

Tanque: 30x30x30(27)

Plantas: *glossostigma elatinoides* con algunas *cryptocorynes* en el fondo, *nymphaea pubescens* var. Roja y *microsorium* en un tronco. Se desea utilizarlo como acuario abierto y darle nivel de iluminación muy alto.

Cálculo: Estimo necesitar entonces $130 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ a nivel del sustrato. Debido a que este acuario tiene una superficie de 0.09 m^2 , necesito en realidad $12 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$. Aplicando la relación con el índice de la Tabla 2 para $\varepsilon=1.2 \text{ m}^{-1}$ obtengo que en la superficie necesito $14 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$. Si divido por eficiencia del reflector, obtengo que en total son necesarios...

Resultado: $18 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$

Factor PURR/PURA sugerido: 1.3.

Lámparas: Utilizo la misma lámpara que en el caso anterior, pero de 20 watt.

Potencia Total: 20 Watt.