

¡Hola! ¿Tú qué cuencas? Yo, las compartidas entre México y EEUU: la XXVII Olimpiada Estatal de Ciencias de la Tierra

Enrique Gómez Treviño

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.

División de Ciencias de la Tierra, Departamento de Geofísica aplicada.

Carretera Ensenada – Tijuana No. 3918, Zona Playitas, C. P. 22860, Ensenada, Baja California, México.

egomez@cicese.mx

Presentación

Una cuenca es un territorio cuyas aguas desembocan todas en un mismo río, lago o mar. El agua de lluvia fluye por gravedad de las partes altas siguiendo cauces existentes o formando nuevos. Se llaman cuencas hidrográficas si solo se consideran las aguas superficiales, y cuencas hidrológicas si también se incluyen las aguas subterráneas. En esta versión de las olimpiadas trataremos sobre cuencas hidrográficas y en particular sobre las tres internacionales entre México y EEUU que son las cuencas de los ríos Tijuana, Colorado y Bravo. La Figura 1 muestra la geografía de las tres cuencas así como la portada y una fotografía sobre el tratado de 1944 entre los dos países.



Fuente: CILA (2017).



Figura 1. 1. Las tres cuencas internacionales entre México y EEUU, y portada y fotografía del Tratado de Límites y Aguas entre los dos países.

El tratado de límites y aguas de 1944 entre México y los EEUU establece las asignaciones de agua de uno a otro país. EEUU le asigna a México del río Colorado y México a EEUU del río Bravo. Los habitantes de Baja California dependemos en gran medida, cerca del 100 %, del agua del río Colorado cuyo cauce está casi en su totalidad en EEUU. Físicamente no dependemos del agua del Río Bravo, aunque de cierta manera hay un lazo a través de la diplomacia del agua. La Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA) se reúne periódicamente para resolver los problemas que siguen surgiendo por sequías y contaminación.

Parte del agua asignada a México del río Colorado se sube por La Rumorosa para cubrir total o parcialmente las necesidades de Tijuana, Tecate, Rosarito y Ensenada. Son 6,000 litros por segundo, a todas horas y todos los días. Parece mucha agua porque una hora tiene miles de segundos y un día muchísimos más. Habría que calcular cuánto le toca a cada persona para saber si es mucha o poca. Por otro lado, subir esa cantidad de agua a La Rumorosa debe costar una fortuna, y de hecho así es, como se verá en una nota periodística más abajo sobre los recibos de la CFE. Sin embargo, no necesitamos saber el monto de los recibos, se puede calcular la energía utilizando la fórmula que aprendieron en sus clases de física para la energía potencial. La

Figura 2 muestra un esquema del acueducto y del resto de la infraestructura para llevar el agua hasta Tijuana,

El objetivo de la olimpiada es familiarizarse con hechos y sucesos, pasados y presentes, lejanos y cercanos que explican nuestra realidad actual en relación con el agua que utilizamos en Baja California. También, acercarnos con nuestros propios cálculos al tamaño de los retos con los que hay que lidiar para que llegue agua a nuestra casa y esté disponible las 24 horas. Las noticias en los medios de comunicación por lo general se limitan a transmitir los números que dio alguna autoridad, sin dimensionarlos o compararlos con otros para hacerlos más accesibles.

Se abordarán aspectos sobre la cantidad anual de lluvia o precipitación anual acumulada y las diferentes unidades de medición como: milímetros, pulgadas y litros por metro cuadrado. También volúmenes totales de agua, presas y sus capacidades de almacenamiento, así como cálculo de caudales. Se podrá utilizar calculadora, pero se recomienda practicar a papel y lápiz operaciones con potencias de diez así como conversión de unidades. Por ejemplo: de acres-pies a metros cúbicos, o de metros por segundo a kilómetros por hora.

PARTICIPACIÓN Y PREMIACIONES

Participaron en el evento 100 estudiantes provenientes de 13 planteles de Ensenada, Mexicali y Tijuana, Baja California. Los estudiantes César Alexander Guzmán Cejas, Dominick Santiago Gómez Palacios y José Alejandro Macías Ramírez, alumnos del plantel Tijuana Siglo XXI del Colegio de Bachilleres (COBACH) ganaron el primero, segundo y tercer lugar, respectivamente, asesorados por la profesora Gabriela de la Selva Rubio, del mismo plantel. Además de su diploma respectivo, los alumnos y la profesora recibieron un incentivo económico, en la ceremonia presidida por Enrique Gómez Treviño, coordinador de la Olimpiada, y Mario González Escobar, tesorero de la UGM.

Palabras clave: Cuencas transfronterizas; Tratado de 1944; Olimpiada de Ciencias de la Tierra.



Figura 2. Perfil del acueducto Colorado-Tijuana. La altura a vencer es $\approx 1,000$ metros y la distancia a cubrir ≈ 100 kilómetros.

Guía para la XXVII Olimpiada de Ciencias de la Tierra para estudiantes de preparatoria de Baja California.

Un evento CICESE-Unión Geofísica Mexicana

Viernes 4 de abril de 2025.

Salón de usos múltiples del CICESE.

Ensenada, Baja California.

NOTAS PERIODÍSTICAS CON NÚMEROS GIGANTESCOS

Los que no somos especialistas, por lo general nos sentimos perdidos por los números gigantes que se manejan en el tema del agua. He aquí unos ejemplos:

NOTA # 1. MARTES, 7 DE ENERO, 2025. SIPSE.COM. El gobierno de México recurrirá a la presa El Cuchillo, la principal fuente de abastecimiento de agua para el área metropolitana de Monterrey, para saldar parte del adeudo de agua que el país mantiene con Estados Unidos. Se contempla extraer 150 millones de metros cúbicos (Mm³) de agua.

COMENTARIO. Aquí la cuestión es saber cuánto es 150 Mm³ con respecto a la deuda. También, si es mucha o poca agua para una presa relativamente pequeña. Algo grave debe estar pasando porque el Río San Juan que alimenta a la presa no está incluido en el tratado, están otros pero no el San Juan. La siguiente nota explica un poco la anterior.

NOTA # 2. SÁBADO, 19 DE OCTUBRE DE 2024. El Heraldo de Chihuahua. Hace cuatro años, durante el conflicto por el pago de agua a Estados Unidos, la presa La Boquilla estaba al 31% de su capacidad. La extracción planeada la reduciría al 18%, lo que motivó la defensa del agua y la toma de la presa, que dejó como saldo una persona muerta, varios lesionados y detenidos. Actualmente la presa está al 15% de su capacidad.

COMENTARIO. Esta nota es mucho más clara que la anterior porque utiliza porcentajes, algo a lo que mucha gente ya está acostumbrada. Queda perfectamente claro que la presa La Boquilla no puede ni debe utilizarse en estos momentos para

abonar a la deuda de agua a EEUU. Va otra nota en la que utilizan Mm³.

NOTA # 3. DOMINGO, 26 DE JUNIO, 2022. El Economista. El estado de Baja California enfrenta la sequía más severa de los últimos 22 años; la principal fuente de abasto de Mexicali, Tijuana y Rosarito es el Río Colorado, de donde este año habrá una reducción de 99 millones de metros cúbicos (Mm³).

COMENTARIO. Este tipo de reducción está contemplada en el tratado con EEUU en tiempos de sequía, y no es para abonar a la deuda de agua, el Colorado se negocia aparte. Para entender qué significan tantos millones necesitamos compararlos con lo que se recibe cada año del río Colorado. Veamos ahora una nota en inglés de una agencia de EEUU.

NOTA # 4. MARTES, 20 DE FEBRERO, 2024. By Leah Sarnoff, ABC NEWS. Over the last five years, 100 billion gallons of untreated sewage, industrial waste and urban runoff have been dumped into the Tijuana River, according to the International Boundary and Water Commission.

COMENTARIO. La nota se refiere a la parte canalizada del río Tijuana cuyas aguas cruzan la frontera hacia EEUU. La parte no canalizada del río aguas arriba se almacena en la presa Abelardo L. Rodríguez. Para entender mejor estas cantidades sería conveniente convertirlas a unidades más familiares. Veamos una nota en la que se manejan cantidades por habitante por día.

NOTA # 5. LUNES, 19 DE FEBRERO, 2024. La Jornada, Tijuana, Baja California. De acuerdo a la OMS, una persona requiere de 100 litros diarios para satisfacer sus necesidades. En México, el consumo por habitante ronda los 360 litros por habitante y en el otro extremo de la cifra estaría Nigeria, con un promedio de consumo de 10 litros al día por habitante, sostuvo José Carmelo Zavala Álvarez, director del Centro de Innovación y Gestión Ambiental (CIGA). En el consumo regional, el condado de San Diego utiliza alrededor de 600 litros al día por habitante, mientras que Mexicali ronda el promedio nacional de 360 litros

al día, y la ciudad de Tijuana es de 200 litros por habitante al día. “El mayor consumo de agua en casa se da en el baño, ya que el mueble sanitario gasta en promedio 6 litros por descarga, la regadera de 12 a 34 litros por minuto, el lavabo 12 litros por minuto”.

COMENTARIO. Esta nota no habla de problemas, es más bien informativa. Los Mm^3 por año que requiere una ciudad se reducen a cantidades que manejamos todos los días. Faltó decir que la factura viene en metros cúbicos por mes, y que el metro cúbico se cobra entre 20 y 40 pesos según la ciudad y el consumo. Vean el recibo de su casa.

NOTA # 6. DOMINGO, 14 DE ENERO DE 2024. EL SOL DE TIJUANA. Los municipios de Tecate, Tijuana, Playas de Rosarito y algunas partes de Ensenada, son abastecidos con agua que es trasladada desde Mexicali mediante el acueducto Río Colorado. Amador Barragán mencionó que en el último mes el pago (por energía eléctrica) fue de aproximadamente 70 millones de pesos, cuando en años anteriores este era aproximadamente entre los 300 a 350 millones de pesos. Esto fue posible tras llegar a un acuerdo con la CFE de cambiar la tarifa de la energía eléctrica como suministro básico, explicó.

COMENTARIO. En este caso el asunto de interés sería el costo por metro cúbico. En otras palabras, cuánto de lo que se cobra en el recibo por metro cúbico es para pagar la electricidad para subirlo por La Rumorosa. Por último una nota con errores en las unidades de volumen.

NOTA # 7. SÁBADO, 8 de FEBRERO. 2020. MILENIO. ¿Por qué México debe pagar agua a Estados Unidos? Aunque la deuda de 220 millones de milímetros cúbicos (mm^3) de agua que México debe pagar a Estados Unidos en octubre próximo obedece a un déficit de los últimos 5 años, en realidad la entrega del líquido tiene su origen en el tratado entre ambas naciones para mantener la paz, tras la guerra México-Estados Unidos por la disputa del territorio texano hace 172 años. Del Río Colorado, Estados Unidos dota a México de mil 850 millones de metros cúbicos de agua cada año; mientras que del Río Bravo a Estados Unidos, México realiza entregas de agua en ciclos

de cinco años, en un promedio mínimo anual de 432 milímetros cúbicos. Pero en 2019, nuestro país tuvo un déficit de 220 mm^3 , adicionales a los 432 milímetros correspondientes que debe entregar a más tardar en octubre próximo.

COMENTARIO. No es raro que se presenten en los medios de comunicación estos errores que solo aumentan la confusión con los números muy grandes. ¿Notaron el error? Se podría argüir que solo se trata del error de utilizar m en lugar de M. O sea, que quisieron escribir 220 Mm^3 pero escribieron 220 mm^3 , un simple cambio de mayúscula por minúscula. Pero no, dos veces se dice explícitamente milímetros cúbicos. La gente de Chihuahua estaría feliz de que fuera cierto que se deben 220 millones de milímetros cúbicos. ¿Cuántos litros son 220 millones de milímetros cúbicos?

CONCEPTOS BÁSICOS

La parte izquierda de la Figura 3 muestra un esquema simplificado de una cuenca hidrográfica. Las líneas punteadas delimitan la cuenca y se conocen como parteaguas en el sentido que parten en dos a la lluvia que cae en sus alrededores. La que cae en la cuenca termina en el río, y la que cae al otro lado termina en otro río. El parteaguas que divide las cuencas de los ríos Bravo y Colorado es un ejemplo espectacular; agua que cae unos metros aparte puede terminar separada por miles de kilómetros de distancia, dependiendo de si cae a uno u otro lado del parteaguas que comparten. Por otro lado, la cuenca del Río Tijuana no comparte nada con las otras dos, aunque con el acueducto ahora está conectada con la del Colorado.

Por lo general, una cuenca tiene sub-cuencas y micro-cuencas como se muestra en la parte derecha de la Figura 3. Sus ríos o arroyos son afluentes que descargan sus aguas en el río principal, y en su conjunto forman un patrón dendrítico (?). Dendrítico: que tiene forma de dendrita. Nos quedamos en las mismas. Dendrita: del gr. *déndron* que significa árbol. Entendido: el río principal es el tronco y los ríos y arroyos afluentes son las ramas. De las tres cuencas la del Río Tijuana es la más dendrítica, o más bella

diría el poeta; las otras dos parecen árboles deformados.

Todos vivimos en una cuenca, aunque no siempre estemos conscientes de ello. En las ciudades se puede apreciar que el agua prefiere unas calles más que otras y que las de más abajo concentran los mayores flujos. Por lo general el agua se sigue hasta un arroyo o río y termina en el mar, pero puede también suceder que se acumule en una zona baja sin salida causando inundaciones. Esto también sucede en la naturaleza. De hecho, es uno de los cuatro tipos de cuencas que existen. La Figura 4 explica cada uno de los cuatro tipos con ejemplos en diferentes estados del país.

No toda el agua que cae en una cuenca termina en el río, la mayor parte se evapora tanto directamente del suelo o a través de las plantas, en lo que llaman evapotranspiración. Otra parte se infiltra al subsuelo y se acumula como agua subterránea en los acuíferos. Lo que termina en los ríos es alrededor del 20 %. La cantidad de agua en un río se puede calcular multiplicando el área de su cuenca por la cantidad de lluvia o precipitación y considerando el factor de escurrimiento de 0.2 que corresponde al 20 %.

EL PESO DE LA HISTORIA

Tanto el río Bravo como el río Colorado, y también el Río Tijuana, estaban totalmente en territorio de la Nueva España como se ilustra en la Figura 5. Esta frontera fue ratificada en el México independiente en 1832 por EEUU en el tratado de Adams-Onís. La frontera norte estaba en parte definida por los ríos Arkansas, Rojo y Sabino como se muestra en la Figura 6. Tres años después, en 1835, Texas se declara independiente fijando su frontera sur en el Río Nueces que está unos 200 km al norte del Bravo a la altura de la ciudad de Corpus Christi. Durante los siguientes 13 años, hasta 1848, los ríos Tijuana, Bravo y Colorado seguían totalmente en territorio mexicano.

Derivado de la guerra con EEUU la frontera se corrió hacia el sur hasta el Río Bravo con el tratado de Guadalupe-Hidalgo de 1848, y se extendió además el territorio de EEUU hacia el oeste hasta California. En el tratado, Sonora llegaba hasta el Río Gila, más o menos 200 km al norte de la frontera actual. Sin embargo, esto cambió con el tratado de la venta de La Mesilla en 1853 con lo que se estableció la frontera actual. El nombre mismo de La Mesilla sugiere que se trata de un territorio pequeño. Sin embargo, se puede apreciar a simple vista que La Mesilla, la

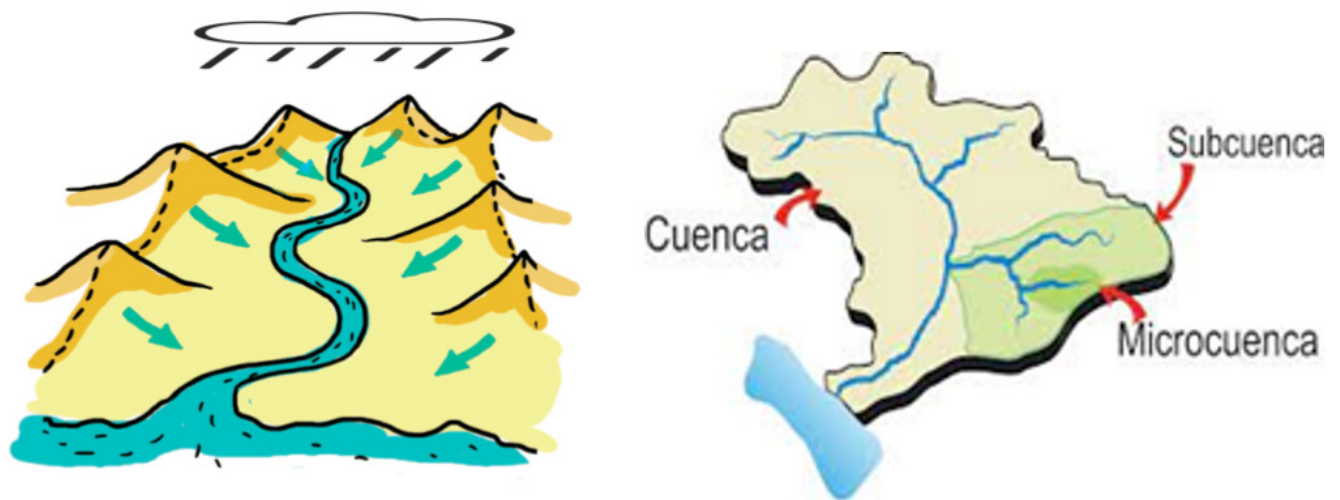


Figura 3. Elementos básicos de las cuencas.

https://es.wikipedia.org/wiki/Cuenca_hidrogr%C3%A1fica

<https://i.pinimg.com/1200x/84/02/72/8402722f91b012fa8633ceec3ee46c77.jpg>



Figura 4. Los diferentes tipos de cuencas.

región entre el río Gila y la frontera actual, tiene un área mayor a la del estado de Baja California.

¿Cómo es que Baja California se salvó de quedar aislada por tierra del resto de México? Se estuvo muy cerca. La clave es el punto donde el Río Gila desemboca en el Río Colorado. Este punto se defendió a toda costa como inamovible en la nueva frontera y así quedó finalmente. Sin embargo, los negociadores mexicanos al parecer

no pudieron evitar que tanto al este como al oeste la frontera quedara más al sur. Noten que las dos líneas rectas trazada desde ese punto tienen inclinaciones hacia México. De hecho, la recta hacia Sonora inicia un poco más al sur y lo hace sobre el río Colorado. Esto hizo que el río se convirtiera en frontera entre EEUU y México como lo es el Río Bravo, pero solo por 27 kilómetros.

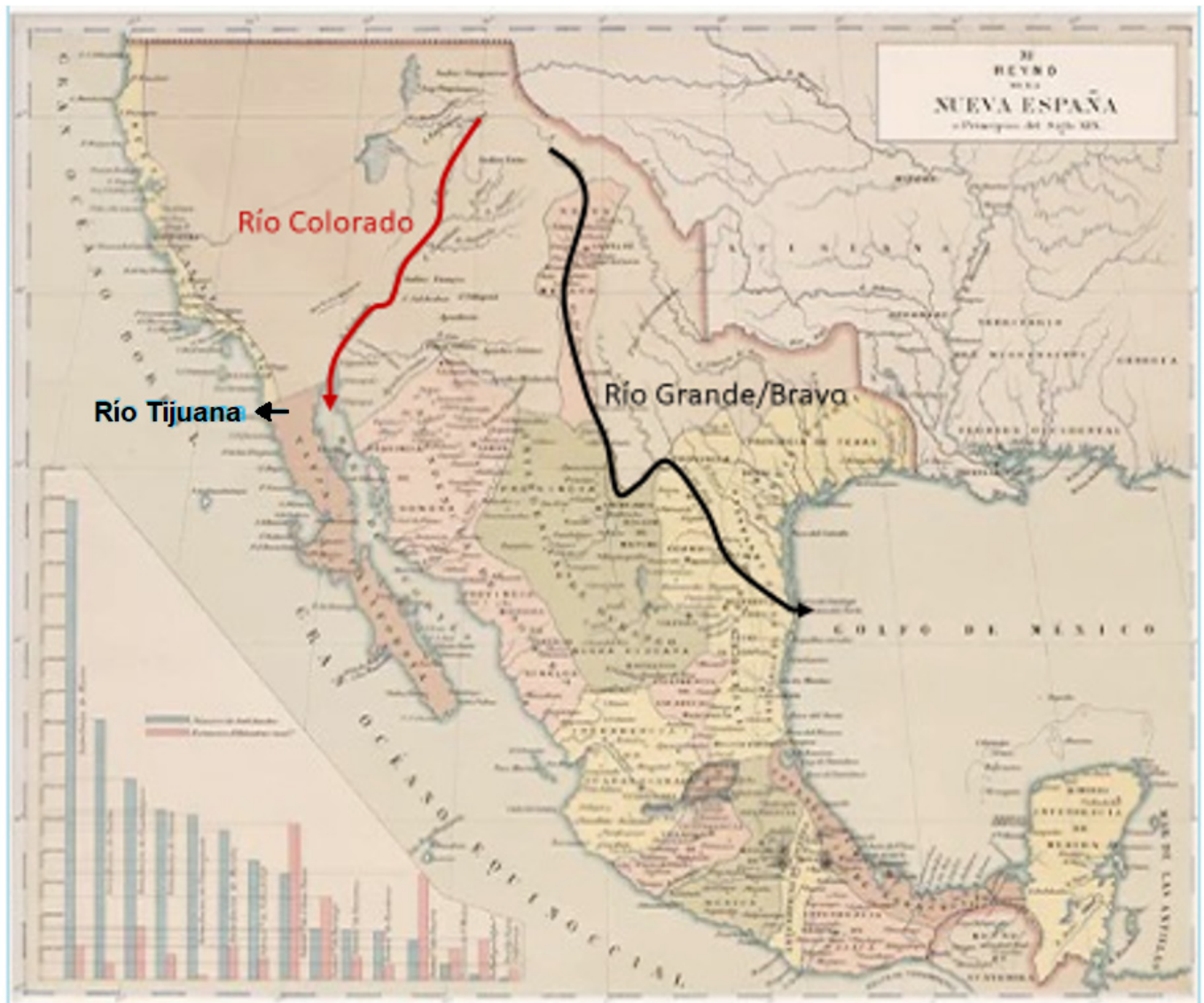


Figura 5. Mapa de la Nueva España con los ríos Tijuana, Bravo y Colorado completamente dentro de su territorio. https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Reyno_de_la_Nueva_Espa%C3%B1a_%28Siglo_XIX%29.JPG



Figura 6. Evolución de la frontera entre México y EEUU y la suerte de los ríos Tijuana, Bravo y Colorado.
<https://billiken.lat/el-mundo/que-territorios-de-estados-unidos-pertenecian-a-mexico/>

El tratado de 1848 también establece que la línea recta hacia el puerto de San Diego terminará a una legua marina (5.5 km) al sur de la parte más meridional (sur) del puerto, lo cual corresponde a la actual Tijuana. La versión popular de que la frontera original estaba más al norte, en la calle Division Street en National City, al parecer no tiene fundamento más allá del nombre de la calle. De hecho, en muchas ciudades de EEUU existen calles con el mismo nombre.

ORDENAMIENTO DE LOS RÍOS EN CATEGORÍAS

Vamos a explorar una forma de ordenar los ríos en categorías que es similar al de los huracanes; pero no es oficial, no existe y no lo encontrarán en ninguna parte. Y no es que esté mal, solo que es demasiado simple. Sin embargo, sí que es útil y práctico como verán.

En la Figura 7 se muestra un mapa de los continentes indicando con colores la cantidad de lluvia que se acumula en un año. En realidad, se trata del promedio de muchos años para compensar las variaciones que hay de año en año. En el mar también llueve pero los datos no se muestran en el mapa. Los lugares donde la lluvia acumulada anual es de más de 1000 milímetros (mm) están en verde oscuro, y donde llueve menos de 224 mm están en rojo. En gris claro están los lugares con menos de 24 mm como el desierto del Sahara donde casi no llueve en todo un año. La península de Baja California está en rojo en las zonas con menos de 224 mm, así como la parte central de EEUU y Canadá y el norte de México.

En el mapa se incluye la localización y caudal de cuatro ríos famosos. Estos son: Nilo, Ganges, Misisipi y Amazonas. El caudal del Nilo se puede escribir como $2.8 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$. Podríamos decir que el Nilo es de categoría 3. El caudal del Ganges se puede escribir como $1.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ y le correspondería la categoría 4. Para el Misisipi se puede escribir $1.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ y su categoría sería también de 4. Finalmente, para el Amazonas $2.2 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{s}$ lo cual correspondería a una categoría de 5. Noten que al hacer ceros a partir de la tercera cifra se pierde exactitud, pero no cambia el exponente y por lo tanto tampoco

la categoría. Se podría incluso redondear a una sola cifra diferente de cero y la categoría sería la misma. Por ejemplo, para el Nilo $2.8 \times 10^3 \approx 3 \times 10^3$ y para el Amazonas $2.2 \times 10^5 \approx 2 \times 10^5$. A simple vista y sin hacer cálculos podemos ver que el Amazonas es más o menos 100 veces más caudaloso que el Nilo. Se puede incluso ser más preciso diciendo que es $2/3$ de 100 veces.

La Figura 8 sitúa en un mapa pluvial de América del Norte a los tres ríos del tratado de aguas entre EEUU y México. Los tres se encuentran en las regiones donde llueve menos en ambos países, y sin embargo los ríos Colorado y Bravo pueden muy bien ser considerados caudalosos con 6×10^2 y $3 \times 10^2 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente. La explicación está en que sus cuencas tienen áreas muy grandes como lo veremos más adelante. Ambos ríos son de categoría dos, siendo el Colorado el doble de caudaloso que el Bravo. Por su parte, el Río Tijuana es categoría cero porque $1.2 = 1.2 \times 10^0 \text{ m}^3/\text{s}$. Un metro cúbico por segundo parecería que es muy poco si lo comparamos con los cientos del caudal de los otros dos ríos. Veamos cuántos metros cúbicos se acumularían en un día. Un día tiene $60 \times 60 \times 24 \text{ s} = 86,400 \text{ s}$. Tendríamos entonces 86,400 metros cúbicos al día. Si consideramos que por habitante se requieren 200 litros al día, tendremos que 5 personas requieren 1,000 litros o bien 1 metro cúbico. Los 86,400 metros cúbicos alcanzarían para $86,400 \times 5 = 432,000$ habitantes, que es más o menos la población de Ensenada.

En este punto es conveniente explicar las unidades de mm en que se mide la precipitación. En algunos noticieros utilizan litros (l) por metro cuadrado (m^2) lo cual es más intuitivo. En realidad numéricamente son iguales. La razón l/m^2 se puede escribir equivalentemente de otra manera. Un litro equivale al volumen de un cubo de 10 cm de lado, o sea $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$. Esto se puede escribir como $0.1 \text{ m} \times 0.1 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}$, o bien 0.001 m^3 . En otras palabras, un litro es la milésima parte de un metro cúbico. Por lo tanto tenemos que $\text{l}/\text{m}^2 = (0.001 \text{ m}^3)/\text{m}^2 = 0.001 \text{ m} = 1 \text{ mm}$. Cuando escuchemos tantos litros por metro cuadrado podemos pensarlo en milímetros, o viceversa. Esto nos lleva a que, para

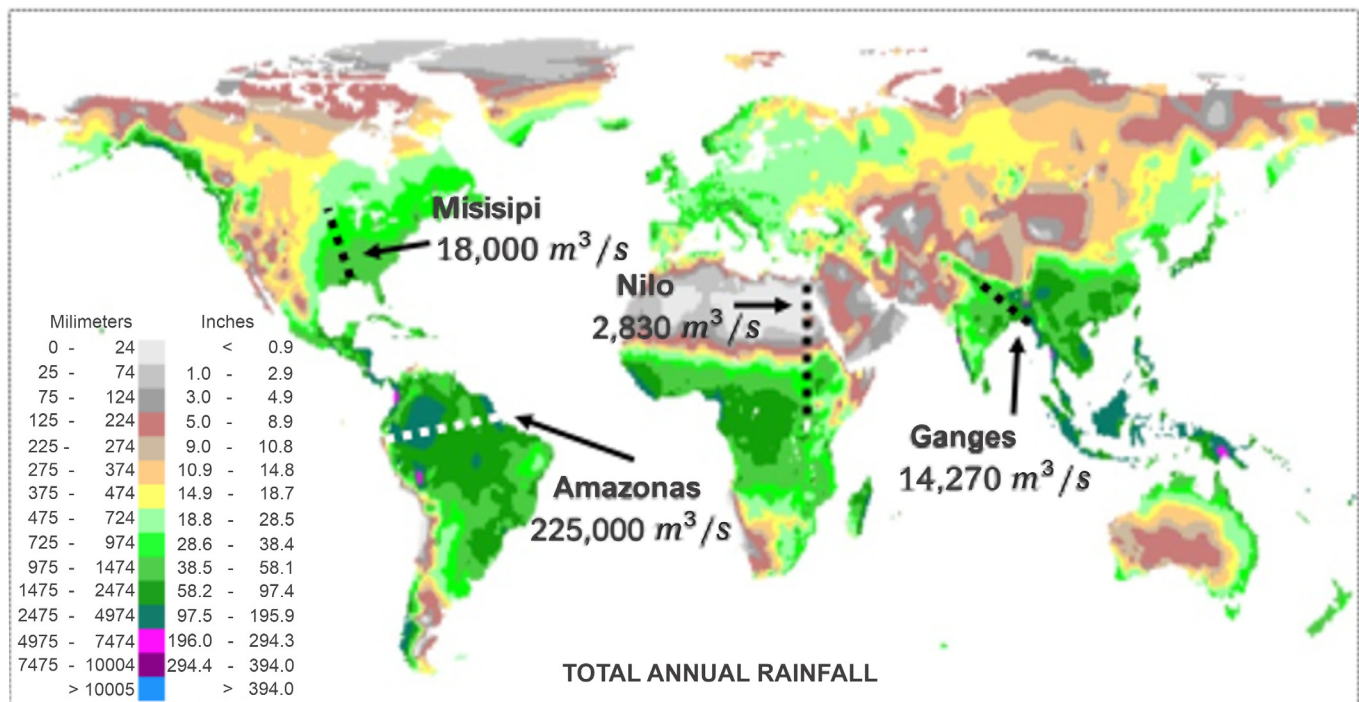


Figura 7. Mapa de la precipitación anual media en los diferentes continentes. Se muestra la localización y el caudal de cuatro ríos famosos. <https://gustavorivero.com/wp-content/uploads/2018/05/lluvias-mapamundi-de-la-pluviosidad.jpg>

medir la precipitación podemos utilizar cualquier recipiente con paredes paralelas sin importar su área, desde un vaso de cocina a un balde de 20 litros, la altura del agua será la misma. ¿O no? Es para pensarlo o experimentarlo con una regadera. Cuando se utilizan pulgadas hay que recordar que 1 pulgada = 25.4 milímetros.

EL RÍO QUE NO PUDO SER NI SERÁ

Para ilustrar el cálculo de volúmenes y caudales vamos a imaginar un río fantástico que llamaremos "Río Baja California". La Figura 9 muestra un esquema del estado de Baja California desde el paralelo 28 que delimita su frontera sur hasta la frontera norte con EEUU. Vamos a suponer que la cuenca de este río es todo el estado. El río corre de sur a norte por lo que se supone que el sur es montañoso y poco a poco se llega al nivel del mar en la frontera norte. Necesitamos esta suposición porque el agua fluye por gravedad. También debemos suponer que las costas en ambos lados son montañosas para que la cuenca del río sea todo el estado. En otras palabras, no queremos que el agua de lluvia se nos escape al

mar. En la realidad las partes altas están más o menos a la mitad entre los dos mares, a todo lo largo de la península. No hay espacio para que se formen cuencas grandes.

Para el cálculo necesitamos la superficie del estado, la cual es de 71,450 km². Para la precipitación anual acumulada utilizaremos 130 mm, la cual es un promedio de lo que llueve en la zona costa (250 mm) donde se encuentran Ensenada y Tijuana y el resto del estado donde llueve menos. El volumen del agua de lluvia se obtiene multiplicando el área del estado por el espesor de la precipitación. Hay que considerar que las dos cantidades deben tener las mismas unidades para que el resultado tenga sentido. La superficie del estado se puede escribir como 71,450 km² = 71,450 km × km = 71,450 × 1000m × 1000m = 71,450 × 10³ m × 10³ m = 71,450 × 10⁶ m². La precipitación de 130 mm en metros es 0.130 m. Por lo tanto el volumen acumulado anual de la cuenca es de 71,450 × 10⁶ m² × 0.130 m = 9,288.5 × 10⁶ m³. Considerando que solo el 20 % de este volumen termina en el río tenemos que multiplicar por un factor que lo disminuya

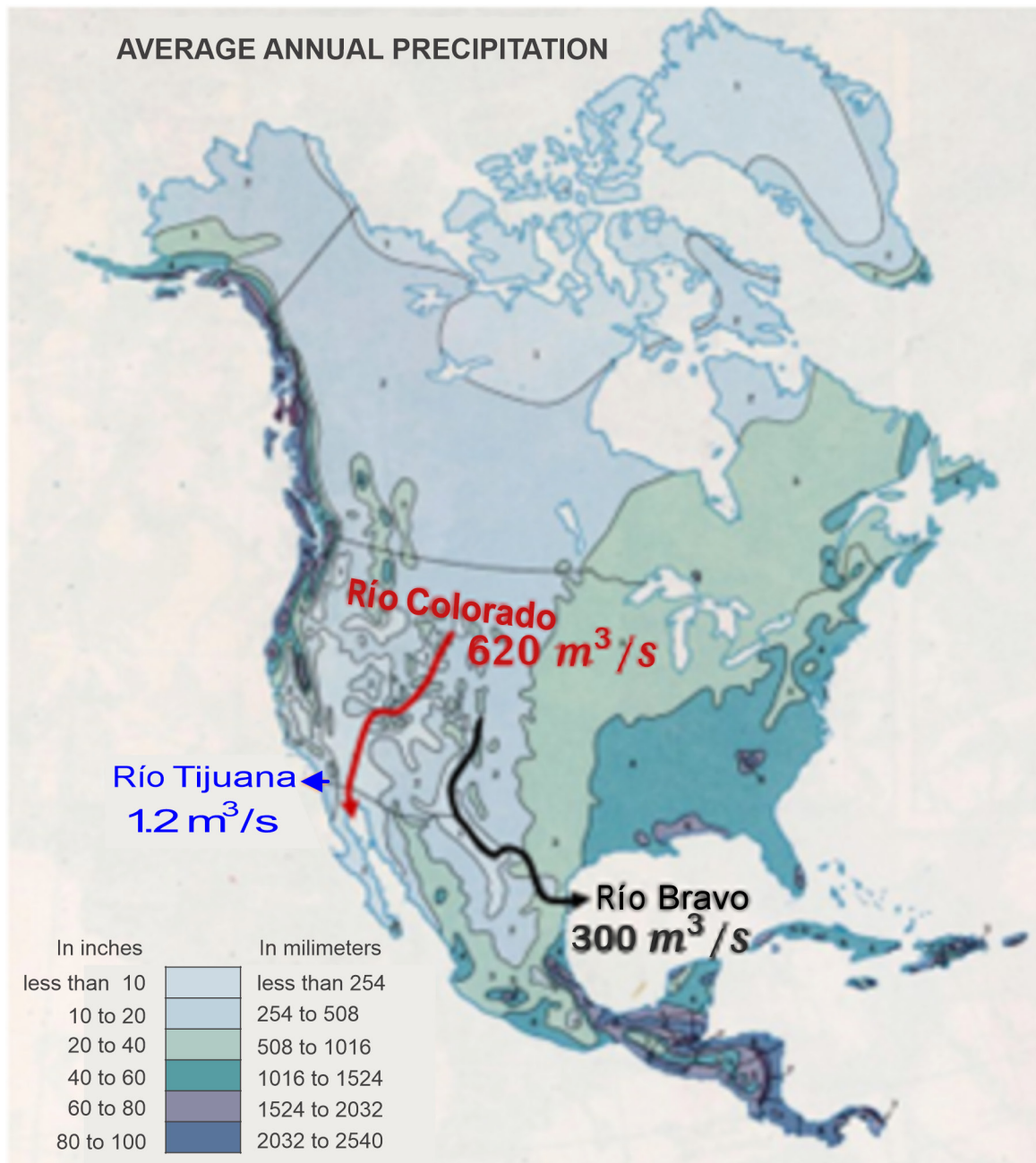


Figura 8. Los tres ríos están en la región donde llueve menos en América del Norte. <https://www.pinterest.com/pin/average-annual-precipitation-map-of-north-america--140807925844939644/>

de acuerdo a este porcentaje. Este factor es $20\% = 20/100 = 0.2$, el cual equivale a la quinta parte porque $0.2 = 1/5$. Multiplicando este factor por el volumen anual de la cuenca tendremos el volumen anual de agua en el río. El resultado es $1,857.7 \times 10^6 \text{ m}^3$. Por lo general a los ríos se les caracteriza por su caudal o gasto en metros cúbicos por segundo (m^3/s). Para calcular el caudal de nuestro río fantástico necesitamos el número de segundos que tiene un año lo cual se puede calcular multiplicando $60 \times 60 \times 24 \times 365 = 31,536,000 \text{ s}$. Esto se puede escribir como $31,536 \times 10^3 \text{ s}$. El caudal es entonces $(1,857.7 \times 10^6 \text{ m}^3) / (31,536 \times 10^3 \text{ s})$.

Realizando las operaciones $(1,857.7 / 31,536) \times 10^{(6-3)\text{m}^3/\text{s}} = 0.058907 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$. El caudal es entonces $58.907 \text{ m}^3/\text{s}$. Redondeando a metros cúbicos por segundo tenemos un caudal de $59 \text{ m}^3/\text{s}$.

Es posible llegar más o menos al mismo caudal sin utilizar calculadora. Para eso necesitamos

hacer algunas aproximaciones como suponer que para la superficie del estado podemos utilizar $70,000 \text{ km}^2$ en lugar de $71,450 \text{ km}^2$. De esta manera la superficie en m^2 se puede escribir como $7 \times 10^{10} \text{ m}^2$. Por otra parte 130 mm puede escribirse como $130 \times 10^{-3} \text{ m}$. La multiplicación se puede hacer mentalmente o a lápiz $910 \times 10^7 \text{ m}^3$. Multiplicando ahora por lo que podríamos llamar el factor de escurrimiento de $0.2 = 2 \times 10^{-1}$ resulta $1,820 \times 10^6 \text{ m}^3 \approx 180 \times 10^7 \text{ m}^3$. Por otra parte, el número de segundos en un año es $31,536 \times 10^3 \text{ s}$, $s = 3.1536 \times 10^7 \text{ s}$. Despreciando las décimas y demás el número de segundos es aproximadamente $3 \times 10^7 \text{ s}$. Tenemos finalmente que el volumen de agua en el río se puede aproximar como $180 \times 10^7 \text{ m}^3$ y el número de segundos del año como $3 \times 10^7 \text{ s}$. El volumen entre el tiempo nos da un caudal de $60 \text{ m}^3/\text{s}$.

Es muy útil practicar este tipo de aproximaciones porque se pueden obtener resultados rápidamente sin necesidad de calculadora. Las cantidades que se manejan son gigantescas por lo



Figura 9. Esquema del río imaginario "Baja California".

que conviene utilizar potencias de diez. Se busca utilizar solo la primera o las primeras dos cifras y todas las demás se pueden suponer que son cero. Veamos en detalle el caso de la superficie del estado: 71,450 km². Este número se puede escribir como $(7 \times 10,000 + 1 \times 1,000 + 4 \times 100 + 5 \times 10 + 0 \times 1)$ km². Un solo mil no compite con los siete diez mil y menos los 4 cientos y demás. Lo mismo con el número de segundos en un año. En el caso de la precipitación de 130 mm no se aproximó a 100 mm porque tres decenas sí compite con un centenar. Un 30% sería un sacrificio demasiado grande. El cálculo exacto del caudal es de 59 m³/s y el aproximado de 60 m³/s. En cualquier negociación de la CILA se utiliza el mayor número de cifras para que la distribución del agua sea lo más equitativa posible. Sin embargo, los ingenieros de la CILA son expertos en este tipo de aproximaciones para proponer o refutar en cualquier discusión modificaciones al tratado. Depender de la calculadora es demasiado lento, además de que se tiende a cometer errores al introducir cifras y más cifras.

HABLANDO SE ENTIENDE LA GENTE

Después de casi 50 años de reclamaciones y 45 de negociaciones, finalmente en 1944 México y Estados Unidos firmaron un tratado sobre cómo distribuirse las aguas de los ríos internacionales Tijuana, Colorado y Bravo.

Río Tijuana

En el tratado de 1944 se incluye al Río Tijuana porque su cuenca la comparten ambos países como se muestra en la Figura 10. No se dan detalles en el tratado sobre cómo se repartiría el caudal. Tal vez esto se debió a que para ese entonces ya existían presas en sus afluentes para captar el agua a ambos lados de la frontera. En EEUU ya se había construido la presa Morena en 1912 y la presa Barrett en 1923, y en México la presa Abelardo L. Rodríguez en 1936. Las presas en Tecate son más recientes: El Carrizo es de 1978 y Las Auras de 2014. Lo único que quedaba por asignar era el agua que cruza la frontera aguas abajo de la presa Abelardo L. Rodríguez. Se determinó que esa agua se le asignara a Tijuana.

Se puede apreciar que la mayor parte de la cuenca está en México pero termina por desembocar en EEUU. Según el tratado el agua que cruza la frontera es de México. Se podría pensar que EEUU debería compensar de alguna manera esa agua que le llega gratis. Sin embargo, el asunto se complica porque esa agua está contaminada. Tijuana tiene plantas de tratamiento para limpiar el agua de la ciudad, las cuales descargan en el río aguas abajo de la presa Abelardo L. Rodríguez. El problema es que esa agua se combina con aguas residuales de asentamientos irregulares y con escurrimientos de la ciudad. Existe además una planta de tratamiento internacional en la frontera pero el agua no la utiliza ninguno de los dos países. La cuestión es que tratar el agua al nivel de que se pueda comercializar es más económico que desalar agua de mar. En esto se ve una oportunidad: cuesta 5 dólares tratar 1,000 galones del agua del río Tijuana, y 10 dólares tratar también 1,000 galones de agua de mar. Un galón equivale a 3.78 l ≈ 4 l. ¿Cuánto es por metro cúbico?

Río Colorado

La Figura 11 presenta los datos básicos sobre el Río Colorado como el área de su cuenca, su longitud y el escurrimiento anual promedio o volumen anual en unidades de hm³ (hectómetros cúbicos). Un hectómetro equivale a 100 metros. Esto es $1 \text{ hm} = 10^2 \text{ m}$. Por lo tanto $1 \text{ hm}^3 = 1 \text{ hm} \times 1 \text{ hm} \times 1 \text{ hm} = 10^2 \text{ m} \times 10^2 \text{ m} \times 10^2 \text{ m} = 10^6 \text{ m}^3 = 1 \text{ Mm}^3$. El escurrimiento anual promedio de 18,340 hm³ es lo mismo que 18,340 Mm³. En los cálculos para el río fantástico “Baja California” para este volumen encontramos 1,820 Mm³. Esto significa que el volumen anual del río Colorado es aproximadamente 10 veces el de nuestro río inventado.

Para el río “Baja California” calculamos un caudal de 60 m³/s. El caudal del río Colorado sería entonces de 600 m³/s. Podemos calcularlo directamente dividiendo 18,340 Mm³ entre el número de segundos que tiene un año $\approx 3 \times 10^7 \text{ s}$. Para hacerlo más fácil escribimos el escurrimiento como $\approx 18 \times 10^9 \text{ m}^3$. A simple vista el resultado de la división es $6 \times 10^2 \text{ m}^3/\text{s}$. El río Colorado es entonces un río de categoría 2. El Nilo es 3, el

Misisipi 4 y el Amazonas 5. Nuestro río fantástico es categoría 1 y el río Tijuana categoría 0.

La comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA) se reúne periódicamente para resolver problemas como el que se plantea en la Figura 11. Si se tiene comprometida más agua de la que provee el río, se tienen que hacer reducciones. Todos los usuarios del río, desde Wyoming hasta Baja California deben disminuir su consumo. El tratado establece que se aplicará el mismo porcentaje a todos los estados. La asignación a México se suministra de forma controlada a lo

largo del año utilizando presas en EEUU. La presa Morelos en Mexicali es una presa para distribuir el agua de riego y no tiene la capacidad para almacenar la asignación anual.

Pensar en volúmenes de miles de millones de metros cúbicos anuales es un reto a la imaginación. Un año es mucho tiempo y por eso se junta muchísima agua. Por otro lado, un metro cúbico es un cubo de un metro de lado y un segundo es lo que nos toma caminar un metro. Estas unidades de metros cúbicos y segundos son más de nuestro tamaño. Pensemos

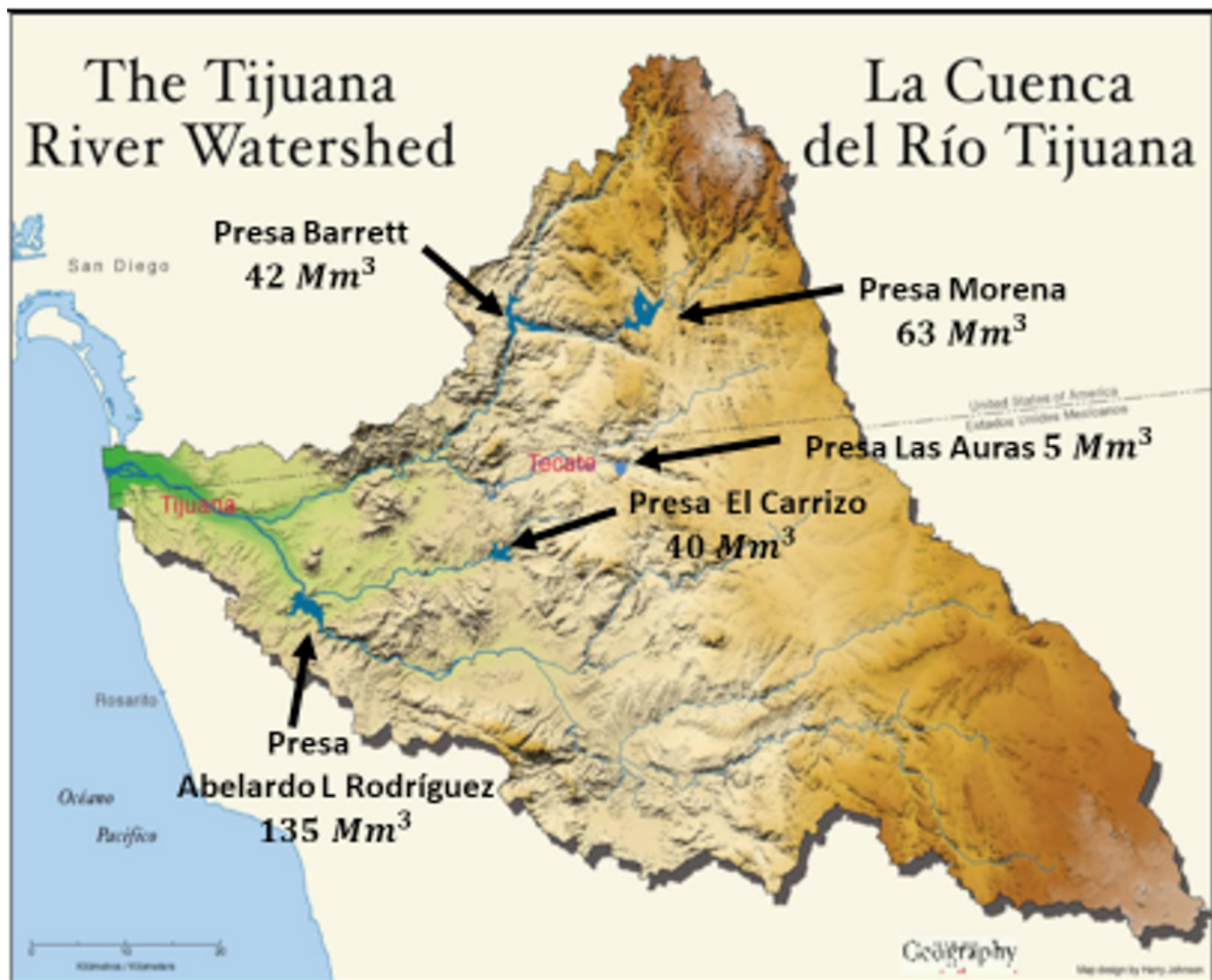


Figura 10. Cuenca del Río Tijuana. <https://trw.sdsu.edu/>

en un río cuyas aguas avanzan a una velocidad de un metro por segundo que es la velocidad de caminar. Si el caudal del río es el de nuestro río fantástico de $60 \text{ m}^3/\text{s}$ podemos imaginarlo de 60 metros de ancho y uno de profundidad. El agua fluye atravesando un área de $60\text{m} \times 1\text{m} = 60 \text{ m}^2$. En un segundo el agua se mueve un metro en la dirección del flujo, por lo que el volumen que cruza esa área es $60\text{m}^2 \times 1\text{m} = 60\text{m}^3$, pero como este volumen cruza en un segundo, tenemos que el flujo es de $60 \text{ m}^3/\text{s}$. Equivalentemente podemos imaginar que el río tiene 30 metros de ancho y dos de profundidad. O bien 15 de ancho y 4 de profundidad, más o menos el ancho de una calle y la altura de una casa de dos pisos, respectivamente. La asignación anual a México que se muestra en la Figura 12 se puede expresar como $\approx 18 \times 10^8 \text{ m}^3$. El año tiene $\approx 3 \times 10^7 \text{ s}$. A simple vista el volumen entre el tiempo nos da $6 \times 10^1 \text{ m}^3/\text{s} = 60 \text{ m}^3/\text{s}$. La asignación del río Colorado a México es equivalente al caudal de nuestro río fantástico.

Río Bravo

Los datos básicos de la cuenca del río Bravo se presentan en la Figura 13. Se puede observar en el mapa que casi todos los afluentes están en el lado mexicano. En el tratado se establece que ambos países deberán compartir el agua en partes iguales. Ambas partes estaban conscientes de que el agua no era suficiente para satisfacer sus necesidades incluyendo las agrícolas. Para saber cuánta agua les correspondería se sumaron todas las aportaciones anuales al río, las cuales llegaron a un total de $10,000 \text{ Mm}^3$, por lo que les tocarían $5,000 \text{ Mm}^3$ a cada uno. El escurrimiento que se reporta en la Figura 13 es parcial y no se refiere al río en su totalidad. Comparativamente, el caso del río Colorado es mucho más simple que la distribución de las aguas del río Bravo. Técnicamente el problema es mucho más complicado.



Figura 11. Datos básicos de la cuenca del Río Colorado.

La asignación a EEUU también es anual pero no es obligatorio cumplirla año con año, pues puede diferirse hasta por cinco años en tiempos de sequía. Las asignaciones anuales se acumulan como deuda que tendrá que pagarse al final del ciclo de cinco años. Si hay deuda al final del ciclo se puede posponer otros cinco años, pero no más. Hace cinco años, en 2020, se cumplió un segundo ciclo en donde el pago de la deuda era mandatorio, de ahí los problemas en Chihuahua. Siempre se ha cumplido con el compromiso, pero por lo general las asignaciones se retrasan y al final se producen conflictos. En octubre de 2025 se acaba un primer ciclo de cinco años y la deuda se acumula. Por lo pronto, el traspaso desde la presa el Cuchillo es un respiro.

En la Figura 14 se menciona que se le asigna a EEUU una tercera parte del agua que llegue a la corriente principal. Se establece además que esta cantidad no será menor a 432 Mm³ anuales. Esto parece indicar que México comparte solamente la tercera parte del río Bravo en lugar de la mitad. Lo que pasa es que ese tercio es lo que falta para completar el 50 %. Previo al tercio se establece que todo lo que llueve en EEUU se le asigna a ese país. Por su parte México no comparte los ríos Álamo y San Juan. En la práctica la distribución se hace mediante las presas internacionales Falcón (1954) y la Amistad (1969) que se construyeron a lo largo del río Bravo.



Figura 12. Volumen de agua del río Colorado que le corresponde a México.

Veamos a cuantos metros cúbicos por segundo equivalen los millones de metros cúbicos quinquenales (no quincenales) que se entregan a EEUU. La cantidad que se muestra en la Figura 15 se puede escribir como $\approx 21 \times 10^8 \text{ m}^3$. Considerando que un año tiene $\approx 3 \times 10^7 \text{ s}$ y suponiendo que en lugar de pagar en cinco años se hace en un año, el caudal equivalente es $70 \text{ m}^3/\text{s}$. Pero como es en cinco años la deuda anual es equivalente a $14 \text{ m}^3/\text{s}$. Podemos obtener esta misma cantidad utilizando la deuda que se muestra en la Figura 14 de 431.721 Mm^3 anuales que se puede aproximar como $\approx 43 \times 10^7 \text{ m}^3$. Dividiendo por el número de segundos en el año $\approx 3 \times 10^7 \text{ s}$ nos da $\approx 14 \text{ m}^3/\text{s}$. Esto confirma que lo que le debemos entregar a EEUU anualmente es el equivalente a un río con caudal de $14 \text{ m}^3/\text{s}$.

La Figura 15 resume cómo se realiza la distribución de las aguas de los ríos Bravo y Colorado entre los dos países. Se mencionan seis ríos cuyas localizaciones se muestran en la Figura 16. El río Conchos en Chihuahua es el más caudaloso con $100 \text{ m}^3/\text{s}$. Los otros cinco están en el estado de Coahuila y sus caudales son: San Diego 3, San Rodrigo 4, Escondido 2, Salado 10 y Arroyo Las Vacas 1 m^3/s . Como se analizó anteriormente, $1 \text{ m}^3/\text{s}$ parece poco pero alcanza para las necesidades de medio millón de personas. En total los cinco suman $20 \text{ m}^3/\text{s}$, que incluyendo al río Conchos, da un total de $120 \text{ m}^3/\text{s}$.

El tratado no dice que se entregue a EEUU $1/3$ de los $120 \text{ m}^3/\text{s}$ que es el caudal total de los seis ríos. Lo que dice es que se entregue $1/3$ de lo que llegue de esos ríos al cauce principal. Como



Figura 13. Datos básicos de la cuenca del río Bravo

el Conchos y el Salado tienen presas pueden no llevar nada de agua al cauce principal, por eso se establece el mínimo de $14 \text{ m}^3/\text{s}$. Los otros cuatro ríos suman $10 \text{ m}^3/\text{s}$, San Diego 3, San Rodrigo 4, Escondido 2 y Arroyo Las Vacas $1 \text{ m}^3/\text{s}$. Faltan 4 para completar los 14. La inclusión del Conchos es importante porque es el único que está aguas arriba de la presa Amistad. En otras palabras, si se excluye al Conchos la presa Amistad no recibe agua de México. Por su parte, el río Salado descarga aguas arriba de la presa Falcón. Los ríos que están excluidos del tratado son el Álamo y el San Juan, los cuales desembocan aguas abajo de la presa Falcón. Por eso es extraña la nota periodística sobre la presa El Cuchillo.

LO QUE CUESTA SUBIR AGUA POR LA RUMOROSA

En la Figura 2 se mostró un esquema del perfil del acueducto Colorado-Tijuana y de la infraestructura necesaria para su funcionamiento, como las estaciones de bombeo y la presa El Carrizo. La construcción del acueducto se inició en 1975 y empezó a funcionar en una primera etapa en 1982. Se completó en 1985 transportando 4,000 litros por segundo. Actualmente transporta 6,000 litros por segundo. Preguntas del público: 1) Si por persona se consumen 200 litros diarios: ¿Para cuántas personas alcanza esta cantidad de agua? 2) El acueducto descarga en la presa El Carrizo cuya capacidad es de 40 Mm^3 : ¿Cuánto tiempo duraría el agua de la presa si se suspendiera el



Figura 14. La entrega mínima de agua a EEUU es de $\approx 432 \text{ Mm}^3/\text{anuales}$.

flujo del acueducto? 3) ¿A qué velocidad viaja el agua por el acueducto? 4) ¿Cuánta energía se necesita para subir esa cantidad de agua por La Rumorosa?

Un litro de agua tiene una masa de un kilogramo, elevarlo 1000 metros requiere una energía o trabajo que se puede calcular con la fórmula $E=mga$, donde E es la energía, m la masa, g la aceleración de la gravedad y a la altura a la que se eleva la masa. Haremos los cálculos para un litro y después simplemente multiplicamos por el número de litros. La masa $m=1$ kg, la gravedad $g=9.8 \text{ m/s}^2 \cong 10 \text{ m/s}^2$ y la altura $a=1,000$ m. El resultado es $E=10,000 \text{ J}$ (julios). Esta energía es la misma independientemente de qué tan rápido se eleve el litro de agua. Conviene suponer que el tiempo de subida sea de un segundo porque

el caudal o gasto del acueducto es en litros por segundo. La potencia o energía por unidad de tiempo viene dada como $P=E/t=(10,000 \text{ J})/(1 \text{ s})=10,000 \text{ W}$ (vatios). Conviene utilizar $1 \text{ kW}=1,000 \text{ W}$ por lo que la potencia que se requiere para elevar un litro en un segundo es 10 kW . Como por el acueducto suben 6,000 litros en un segundo la potencia total es de $60,000 \text{ kW}=60 \text{ MW}$, donde M significa mega o millón. El cálculo que hacemos aquí no toma en cuenta que también se requiere energía para mover horizontalmente el agua para vencer la fricción con la tubería.

La Comisión Federal de Electricidad (CFE) cobra la energía que utilizamos, o sea la potencia multiplicada por el tiempo. Un horno eléctrico de cocina que utilice $1,000 \text{ W}$ o equivalentemente 1

DISTRIBUCIÓN DE LAS AGUAS DE LA CUENCA DEL RÍO BRAVO			
	Cantidad Anual Mm ³	Cantidad Quinquenal Mm ³	Tributarios
2/3 partes			
Asignaciones a México 		4, 317 210 000	Río Conchos Río San Diego Río San Rodrigo Río Escondido Río Salado Arroyo de Las Vacas
1/3 parte			
Asignaciones a Estados Unidos 		2, 158, 605 000	Río Conchos Río San Diego Río San Rodrigo Río Escondido Río Salado Arroyo de Las Vacas
DISTRIBUCIÓN DE LAS AGUAS DE LA CUENCA DEL RÍO COLORADO			
Asignaciones a México 	1, 850 234 000		

Figura 15. Tributarios del río Bravo cuyas aguas se comparten con EEUU y la distribución de las aguas de la cuenca del río Colorado.

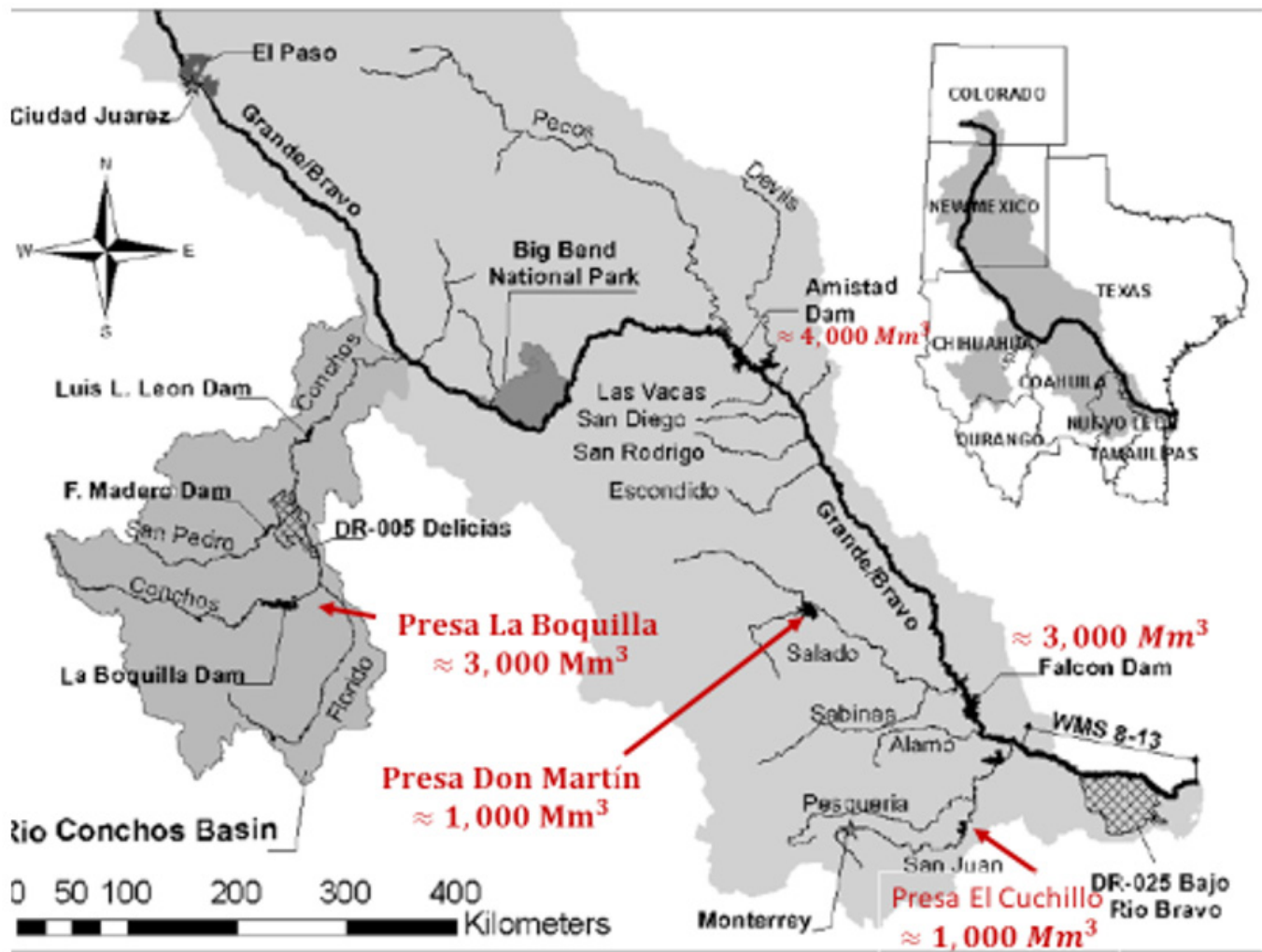


Figura 16. Río Bravo y sus afluentes. La entrega de agua a EEUU se realiza principalmente mediante las presas internacionales Amistad y Falcón. https://www.researchgate.net/figure/Rio-Grande-Bravo-Basin_fig1_269091665

kW de potencia y que esté en operación una hora utilizará 1 kWh de energía, cuyo costo puede variar desde un peso a cuatro pesos dependiendo del consumo. Los 60 MW son equivalentes a 60,000 kW, los cuales si se mantienen en operación por una hora representarán 60,000 kWh. Si se cobran a un peso serán 60,000 pesos por hora y si a cuatro pesos 240,000 pesos por hora. Esto es mucho dinero por hora, pero veamos cuánto es por metro cúbico. En una hora se reciben en la presa El Carrizo $(6 \text{ m}^3/\text{s}) \times 60 \times 60 \text{ s} = 6 \times 3,600 \text{ m}^3$. El resultado es $21,600 \text{ m}^3 \approx 20,000 \text{ m}^3$. Dividiendo los pesos entre los metros cúbicos tenemos que el costo de la electricidad será de entre 3 y 12 pesos/ m^3 según la tarifa de la CFE.

También es interesante saber cuánto tiempo tarda el agua para llegar desde Mexicali a la presa El Carrizo, a 100 km de distancia. Calculemos primero la velocidad, para lo cual necesitamos el área transversal del acueducto. Su diámetro es de $1.22 \text{ m} \approx 1.2 \text{ m}$ por lo que su área será $A = \pi r^2 = 3.14 \times 0.6^2 \approx 3 \times 0.36 \approx 1 \text{ m}^2$. Sabemos que el gasto $Q = v \times A$ por lo que $6 \text{ m}^3/\text{s} = v \times 1 \text{ m}^2$. Aquí ni siquiera es necesario despejar la velocidad. Es claro que $v = 6 \text{ m/s}$. Para convertir la velocidad a km/h multiplicamos por $(1) \times (1) = ((1 \text{ km})/(1,000 \text{ m})) \times ((60 \times 60 \text{ s})/(1 \text{ h}))$. Esto es lo mismo que $3.6 \text{ (km s)}/(\text{m h})$. Tenemos entonces $v = 6 \text{ (m/s)} \times 3.6 \text{ (km s)}/(\text{m h}) = 6 \times 3.6 \text{ km/h} = 21.6 \text{ km/h} \approx 20 \text{ km/h}$. El agua que entra al acueducto en Mexicali tarda 5

horas en llagar a la presa El Carrizo, pero esto no se nota porque el flujo es continuo. De ahí pasa a la planta potabilizadora El Florido para después distribuirse en Tijuana y Rosarito y enviar a Ensenada 100 l/s los cuales representan el 1.7 % de los 6,000 l/s del acueducto.

Encontramos más arriba que llegan a El Carrizo 21,600 m³ en una hora. En ese cálculo no intervienen directamente la velocidad de agua ni el área del acueducto. Veamos ahora qué se obtiene si utilizamos la velocidad del agua y el área del acueducto. Queremos saber el gasto del acueducto en unidades de m³/h, lo que nos daría la cantidad de m³ que llegan al El Carrizo en una hora. El gasto se puede calcular como $Q=v \times A$. La velocidad $v=21.6$ km/h y el área $A=1$ m². La velocidad $v=21.6$ km/h=21,600 m/h que multiplicados por el área $A=1$ m² da como resultado $Q=21,600$ m³/h. Con esto comprobamos que la velocidad del agua en el acueducto es compatible con lo que llega a El Carrizo en una hora.

En el siglo III llegaba agua a Roma a través de 11 acueductos que sumados tenían una longitud de 800 km. El volumen de agua era de 1 Mm³/día. Para comparar con el acueducto Colorado-Tijuana necesitamos pasar esta cantidad a l/s. ¿Recibía más Roma que Tijuana?

La presa La Boquilla en Chihuahua produce 25 MW de electricidad. Se aprovecha que el agua está a mayor altura a un lado del bordo que del otro. El bordo de La Boquilla tiene 80 m de altura. Queremos saber cuántos metros cúbicos por segundo se requieren para producir los 25 MW. Podemos utilizar la fórmula de la energía potencial $E=mga$, donde m es la masa, g la aceleración de la gravedad y a la altura. En lugar de energía suponemos energía por segundo (potencia) y en lugar de masa, masa por segundo. La fórmula es ahora $P=m_s g a$, donde P es potencia en W y m_s es en kg/s=l/s. Podemos entonces obtener directamente los l/s que se necesitan para producir determinados W utilizando la fórmula $m_s=P/ga$. Por lo tanto $m_s=(25 \times 10^6)/(10 \times 80)=25/8 \times 10^4 \cong (24/8) \times 10^4=30 \times 10^3$ l/s=30 m³/s.

LA MULTIPLICACIÓN Y DIVISIÓN DE LAS AGUAS

Multiplicación

Para cosechar cultivos que requieren hasta 1,000 litros de agua por metro cuadrado en zonas donde apenas si llueve 100, es cuestión de ingeniárselas. Las presas permiten regar plantíos a voluntad, llueva o no llueva y en la cantidad requerida. Controlan además las inundaciones y pueden producir energía eléctrica. Las principales presas del río Bravo se indican en el mapa de la Figura 16, y las del Colorado en la Figura 17. Se puede observar que las presas del río Colorado tienen capacidades 10 veces mayores que las del río Bravo, aunque solo tiene el doble del caudal. La presa Morelos en Mexicali tiene muy poca capacidad de almacenaje, se utiliza solo para distribuir el agua en los distritos de riego de Baja California y Sonora. En el tratado de 1944 se contempla asignar anualmente $1,850 \text{ Mm}^3 \approx 2 \times 10^9 \text{ m}^3$ para regar $200,000 \text{ ha} = 2 \times 10^9 \text{ m}^2$. Dividiendo el volumen por el área obtenemos la altura que alcanzaría el agua sobre el área de riego. La aproximación hace que la operación sea obvia sin necesidad de calculadora. La altura es un metro, mil milímetros o mil litros por metro cuadrado cada año. Esto es lo que se requiere para cosechar maíz, alfalfa o algodón, entre otros cultivos. En las áreas de riego ciertamente se multiplica la precipitación natural. Sin embargo, como se hace artificialmente esto deberá compensarse en alguna otra parte con una división.

División

La mayor parte del uso del agua en el mundo es para la agricultura, con 70%, industria 20 % y solo 10 % para usos domésticos. Con el agua de la cuenca del río Bravo se riegan casi un millón de hectáreas y la utilizan 15 millones de personas en sus casas. En EEUU se aprovechan sus aguas en los estados de Colorado, que es donde nace, Nuevo México y Texas, y en México, en Chihuahua, Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas. Solo el 5 % del caudal natural llega a la desembocadura del río. En otras palabras, los humanos usan en la agricultura y otros fines el 95 % del agua de la cuenca del río Bravo. Se puede calcular que el 5 % que llega al mar es $\approx 14 \text{ m}^3/\text{s}$, lo cual es lo

misma que entrega México a EEUU por el tratado. Esta agua es de los dos países y podrían decidir utilizarla aguas arriba en la agricultura regando $\approx 25,000$ hectáreas (ha) al año cada uno. Para llegar a este número consideren el caso del río Colorado que con $600 \text{ m}^3/\text{s}$ riegan dos millones de hectáreas, lo cual se reduce a 0.3 l/s por hectárea. Lo mismo se obtiene considerando los $60 \text{ m}^3/\text{s}$ para regar 200 mil hectáreas en Mexicali. Sin embargo, si se decidiera usar $14 \text{ m}^3/\text{s}$ aguas arriba, el río Bravo se quedaría seco. ¿Se puede uno imaginar al río Bravo sin agua?

El que sí se quedó sin agua es el delta del río Colorado. Hace décadas que no llega agua al mar de Cortés, excepto por el evento “flujo pulso” en 2014, cuando se liberaron 105,000 acres-pies en 2 meses para estudiar la recuperación del delta. Hubo un segundo pulso en 2021 que duró 5 meses donde se liberaron 35,000 acres-pies. Para comparar estas cantidades con el caudal del río de $600 \text{ m}^3/\text{s}$ hay que convertir los acres-pies a metros cúbicos: $\text{acre-pie}(0.3\text{m}/\text{pie})(0.4 \text{ ha}/\text{acre})=0.12 \text{ m ha}$. Ahora hay que convertir una ha en m^2 . El resultado es $\text{acre-pie}=1,200 \text{ m}^3$. Por lo tanto el volumen sumado de los dos pulsos es $14 \times 1.2 \times 10^7 \text{ m}^3$, donde se utiliza el exponente 7 para facilitar la operación porque el volumen se va a dividir por $3 \times 10^7 \text{ s}$, el número de segundos en un año. El resultado es $\approx 6 \text{ m}^3/\text{s}$. Esto significa que del caudal anual del río Colorado se ha dejado pasar al delta el equivalente al 1%, no año con año, sino un solo año en seis décadas. Esto contrasta con el 5 % del caudal del río Bravo que se deja pasar a la desembocadura, este sí, año con año, de tal forma que siempre hay agua fluyendo. Tal vez, más que conservar el ecosistema, lo que ha pesado más en la decisión es que el agua de cierta manera funciona como muro en la frontera. En el delta del Colorado no pasa nada, ni agua, tal vez porque no es frontera internacional.

LAS POTENCIAS DE DIEZ LE VAN BIEN A BAJA CALIFORNIA

Los números del agua de Baja California resultan muy fáciles de imaginar y recordar para el caudal del río Colorado, la asignación a México

y el acueducto Colorado-Tijuana. Estos son, respectivamente: 600, 60 y $6 \text{ m}^3/\text{s}$. En otras palabras, si el caudal del río es 100 unidades, entonces llegan a Mexicali 10, y de esos 10 se envía 1 a Tijuana. Buscando en los medios de comunicación una cantidad de agua que resultara ser el 10 % del caudal del acueducto lo encontramos en Mexicali. Recordarán que hace varios años se anunció la cancelación de una planta cervecera que se estaba construyendo en Mexicali, en la zona agrícola, en la que se planeaba utilizar anualmente 20 Mm^3 . Para dimensionar esta cantidad vamos a dividir este volumen por los segundos que tiene un año $\approx 3 \times 10^7 \text{ s}$. Recordando que M significa millón o sea 10^6 el volumen se puede escribir como $2 \times 10^7 \text{ m}^3$ por lo que la división se reduce simplemente a $2/3 \approx 0.6 \text{ m}^3/\text{s}$. Tenemos así cuatro cantidades que se van reduciendo por un factor de 10 en Baja California: 6×10^2 , 6×10^1 , 6×10^0 y 6×10^{-1} metros cúbicos por segundo. Suertudo el Estado, le van bien las potencias de diez.

En cuanto al río Bravo, su caudal de $300 \text{ m}^3/\text{s}$ es la mitad del Colorado y se reparte entre los dos países en partes iguales. Para ser equitativo México le entrega aproximadamente el 5 % a EEUU, dejando ambos países otro 5 % para que llegue al mar. De México a EEUU $14 \text{ m}^3/\text{s}$ y de EEUU a México $60 \text{ m}^3/\text{s}$. Por cada litro entregado en el Bravo, se reciben cuatro en el Colorado.

EL INCREÍBLE USO DEL AGUA EN LA PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS

No van a creer la información que se presenta en la Figura 18. Un litro de leche requiere para su producción de 1,000 litros de agua. En otras palabras, se requieren 5 tambos de agua de 200 litros, de esos que se utilizan para la basura, para producir un solo litro de leche. A esto le llaman la huella hídrica de la leche. Todos los alimentos tienen su huella hídrica. Una que es simple de calcular es la del maíz. Utilizaremos 8 toneladas por hectárea como productividad típica, y supondremos que se regó con 1,000 mm de agua, ya sea de lluvia o tomada de alguna presa. 1,000 mm es lo mismo que 1,000 litros por metro cuadrado ($10^3 \text{ l}/\text{m}^2$). Una hectárea equivale a 10^4 m^2 por lo que el volumen total de agua utilizado es



Figura 17. Río Colorado y sus afluentes. La entrega de agua a México se hace de forma programada a lo largo del año mediante diferentes presas como la Hoover y Glen Canyon. https://www.wikiwand.com/es/articles/Lago_Granby#/media/Lago_Granby|Archivo:Coloradorivermapnew.jpg

$10^3 \text{ l/m}^2 \times 10^4 \text{ m}^2$. Tenemos entonces un volumen de 10^7 litros para producir 8 toneladas u $8 \times 10^3 \text{ kg}$. Dividiendo los litros por los kg obtenemos 1,250 l/kg, que es aproximadamente lo mismo que en la figura. Suponiendo que salen 30 tortillas de un kg de maíz, se necesitan ≈ 40 litros por cada tortilla, dos garrafones de 20 litros. ¿Dos garrafones de agua para producir una tortilla? Así es.

A la huella hídrica también se le llama agua virtual porque es la cantidad de agua que se necesita para obtener un producto pero que ya no está en el producto y no la vemos. El promedio mundial de agua virtual per cápita es de 1,400 metros cúbicos por año. ¿Cuánto utilizamos per cápita al año en los domicilios, suponiendo un promedio de 200 litros por día? Verán que el agua que utilizamos en las casas es un porcentaje pequeño del agua



Figura 18. Litros de agua que se requieren para producir diferentes alimentos

virtual. Otra forma de dimensionar la magnitud del agua virtual es utilizando la importación de alimentos. México es un importador neto de agua virtual, o sea que importamos más de lo que exportamos, principalmente por la importación de carnes y cereales. Por ejemplo, año con año importamos 20 millones de toneladas de maíz amarillo, principalmente para consumo animal en la producción de carne de res, cerdo, pollo, huevo y leche. Nos preguntamos por la cantidad de agua que se necesita para producir esos 20 millones de toneladas de maíz. Supongan una producción de 10 toneladas por hectárea. Hagan el cálculo en m^3/s y comparen con el caudal del río Colorado. Se van a sorprender.

Para concluir, volvamos a la comida de todos los días haciendo suposiciones razonables. Por ejemplo, que 20 huevos pesen un kg. Utilizando la tabla de la huella hídrica obtendremos que para producir un huevo se necesita casi un tambo de agua, al que para llenarlo solo le faltaría una tortilla. ¿Increíble? Espérense a la carne de res. De un kg de carne de res pueden salir 20 tacos de carne asada. Hagan sus cuentas. La carne en un taco necesita para su producción varios tambos de agua. ¿Con aguacate y salsa? ¿Otro taco?

RECOMENDACIONES

Leer la guía varias veces y buscar entre líneas las posibles preguntas. Ubiquen en los mapas los ríos y presas. Con lápiz y papel rehagan las operaciones. Practiquen las aproximaciones de los ejemplos. Y sobre todo, pregunten si no saben algo. Hagan búsquedas de la huella hídrica de otros productos. Discutan entre ustedes y con sus maestros. Formen pequeños grupos y repártanse las secciones, luego se explican unos a otros. Vean en YouTube videos al respecto, particularmente los del Dr. Samuel Sandoval, profesor de la Universidad de California Davis y experto en el tratado y sus detalles, son en español.

EL EXAMEN

El examen consistirá de 100 preguntas y tendrá una duración máxima de 2 horas. Se recomienda traer calculadora, aunque si practican las aproximaciones que se explicaron podrán resolver las preguntas más rápido sin calculadora.

INSCRIPCIONES

Es muy conveniente que se preinscriban a más tardar unos días antes del concurso, ya sea en forma individual o en grupo por correo electrónico, según se indica en esta página. Haciéndolo así nos permite planear mejor la cantidad de exámenes que debemos imprimir, etc.

Por lo general recibimos alrededor de 90 participantes. Aunque nunca hemos puesto límite, de ser necesario limitaremos a 100 el número de participantes. Habrá pan, café, chocolate y frutas para quienes no hayan desayunado. De 8:00 a 10:00 AM serán las inscripciones. A las 10:00 AM inicia el examen y se termina a las 12:01 PM. Antes de la comida tendremos, como siempre, la visita a varios laboratorios incluyendo la red sísmológica donde se analizan las señales de los sismos que ocurren en Baja California, Sonora y el Golfo de California principalmente.

Las premiaciones se harán de 2:00 a 3:00 PM. Saludos cordiales y buena suerte. Los esperamos en Ensenada.

Atentamente,

Dr. Enrique Gómez Treviño.
Coordinador de las Olimpiadas

LAS 100 PREGUNTAS DEL EXAMEN

1. Altura que hay que vencer para subir el agua de Mexicali por La Rumorosa en el acueducto Colorado-Tijuana:

- a) 1 km b) 100 m c) 2,000 m d) 1.5 km

2. Longitud del acueducto Colorado-Tijuana:

- a) 10 km b) 60 km c) 50 km d) 100 km

3. El acueducto Colorado-Tijuana conduce:

- a) 60 m³/s b) 600 l/s
c) 60 l/s d) 6,000 l/s

4. Los 150 Mm³ que se tomaron de la presa El Cuchillo en enero de 2025 para abono de la deuda con EEUU, equivalen al agua acumulada por un año de un río con caudal de:

- a) 5 m³/s b) 500 l/s
c) 0.5 m³/s d) 14 m³/s

5. Un río con un flujo de 1 m³/s puede suplir las necesidades de agua de una ciudad con un máximo de habitantes. Suponiendo un consumo de 200 litros de agua por habitante por día, el máximo de habitantes es:

- a) 130,000 h b) 230,000 h
c) 330,000 h d) 430,000 h

6. La respuesta a la pregunta 4 es cierto número de m³/s. La respuesta a la pregunta 5 es el número de habitantes por cada m³/s. Por lo tanto, multiplicando el número de la pregunta 4 por el de la pregunta 5, obtenemos el número máximo de habitantes que por un año podrían consumir 200 litros por día con los 150 Mm³. El número de habitantes es:

- a) 650,000 h b) 1,150,000 h
c) 1,650,000 h d) 2,150,000 h

7. La presa La Boquilla en Chihuahua tiene una capacidad máxima de ≈4,000 Mm³. En octubre de 2024 la presa estaba al 15 % de su capacidad máxima. ¿Cuánta agua le faltaba para llenarse?

- a) 600 m³ b) 3,400 Mm³
c) 6,000 Mm³ d) 3,750 Mm³

8. En el año 2022 en Mexicali se recibieron ≈100 Mm³ menos de lo que normalmente se recibe del río Colorado que son ≈2,000 Mm³. ¿Qué porcentaje se recibió en relación a lo normal?

- a) 10% b) 5% c) 90% d) 95%

9. La disminución de 2022 del río Colorado a Mexicali se puede expresar en m³/s para ese año. ¿Cuántos m³/s?

- a) 3 m³/s b) 1 m³/s
c) 6 m³/s d) 2 m³/s

10. Esta disminución comparada con el caudal o gasto del acueducto Colorado-Tijuana es:

- a) un tercio b) la mitad
- c) igual d) el doble

11. En la nota de febrero de 2024 de la cadena NBC News se reporta que en los últimos 5 años, se han echado al río Tijuana y cruzado la frontera, 100 billones de galones de drenaje sin tratar, desechos industriales y escurrimientos de la ciudad. Los billones son billones americanos, que equivalen a 1,000 millones. ¿A cuánto equivale en m³s en cinco años el volumen mencionado?

- a) 12.5 m³/s b) 10 m³/s
- c) 5 m³/s d) 2.5 m³/s

12. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS): ¿Cuántos litros de agua diarios requiere como mínimo una persona para satisfacer sus necesidades de consumo e higiene?

- a) 200 litros b) 100 litros
- c) 360 litros d) 60 litros

13. ¿Cuál es el promedio en México del consumo de agua por habitante?

- a) 360 litros b) 260 litros
- c) 200 litros d) 100 litros

14. ¿Cuál es el promedio en Mexicali del consumo de agua por habitante?

- a) 360 litros b) 260 litros
- c) 200 litros d) 100 litros

15. ¿Cuál es el promedio en Tijuana del consumo de agua por habitante?

- a) 360 litros b) 260 litros
- c) 200 litros d) 100 litros

16. ¿Cuál es el promedio en Ensenada del consumo de agua por habitante?

- a) 360 litros b) 260 litros
- c) 200 litros d) 100 litros

17. ¿Cuál es el promedio en San Diego del consumo de agua por habitante?

- a) 400 litros b) 500 litros
- c) 600 litros d) 800 litros

18. Para subir el agua por un tubo se necesita empujarla de alguna manera. Así como un abanico en un tubo empuja aire también puede empujar agua. El acueducto funciona con abanicos gigantes llamados estaciones de bombeo. ¿Cuántas estaciones de bombeo hay en el acueducto Colorado-Tijuana?

- a) 4 b) 5 c) 6 d) 7

19. Aproximadamente la mitad de la longitud del acueducto es cuesta arriba y la otra mitad es casi horizontal. En la parte horizontal había que rodear picos en La Rumorosa que, haciendo cálculos, resultaba más práctico y económico perforar las rocas y hacer túneles para continuar con el acueducto. Se perforaron dos túneles, túnel 1 y túnel 2. ¿Cuál es la longitud del túnel 1?

- a) 5 km b) 6 km c) 7 km d) 8 km

20. ¿Cuál es la longitud del túnel 2?

- a) 2 km b) 3 km c) 4 km d) 5 km

21. Las estaciones de bombeo están en la primera mitad del acueducto. Si suponemos que son 6 estaciones la separación promedio entre ellas sería de:

- a) 5 km b) 6 km c) 7 km d) 8 km

22. Una estación de bombeo de determinada potencia puede elevar el agua del acueducto solo hasta cierta altura. Suponiendo que sean 6 estaciones igualmente espaciadas en alturas ¿Cuál sería la diferencia de altura entre las estaciones?

- a) 146 m b) 159 m c) 167 m d) 187 m

23. En una vivienda promedio el lugar donde se utiliza más agua es en:

- a) lavandería b) fregadero
c) sanitario d) regadera

24. En un reporte de la CEABC de enero de 2022 se dice en relación con el acueducto Colorado-Tijuana: "En este año se han bombeado 14,966,765 millones de metros cúbicos, lo que nos representa un gasto promedio de 5,588 l/s". Llama la atención los casi 15 millones de millones de metros cúbicos que se bombearon en un mes. La cantidad bombeada se puede escribir como $\approx 15 \times 10^{12} \text{ m}^3$. Vamos a suponer que este volumen corresponde a un año. ¿Cuál es el caudal equivalente?

- a) $5 \times 10^2 \text{ m}^3/\text{s}$ b) $5 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$
c) $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ d) $5 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{s}$

25. Ninguna de las cuatro opciones de respuesta a la pregunta anterior es realista. La primera es un río de categoría 2 como el Colorado, la segunda es uno de categoría 3 como el Nilo, la tercera es uno de categoría 4 como el Misisipi, y la cuarta es uno de categoría 5 como el Amazonas. Imposible que hayan bombeado por el acueducto esas cantidades en un año, mucho menos en un mes. Obviamente el volumen que da la CEABC no puede ser correcta. Es tan grande la cifra que tal vez se trate simplemente que le sobra la palabra millones. Quitando la palabra millones el caudal recalculado suponiendo de nuevo un año de flujo sería de:

- a) $2.0 \text{ m}^3/\text{s}$ b) $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$
c) $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$ d) $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$

26. El cálculo anterior supone que el volumen es lo bombeado en un año, no en un mes como dice la CEABC. Esto hace que el caudal calculado sea 12 veces más pequeño. Multiplicando por 12 las opciones anteriores se obtienen las siguientes, ¿Cuál es la correcta?:

- a) $24 \text{ m}^3/\text{s}$ b) $18 \text{ m}^3/\text{s}$
c) $12 \text{ m}^3/\text{s}$ d) $6 \text{ m}^3/\text{s}$

27. Ahora sí, con calculadora utilicen todas las cifras del bombeo pero sin considerar la palabra millones. Al parecer ese es el problema. Calculen el caudal en m^3/s para el mes de enero, sin olvidar que enero tiene 31 días. El valor correcto es:

- a) 5,588 l/s b) 558.8 l/s
c) 55.88 l/s d) 5.588 l/s

28. En la nota de El Sol de Tijuana de enero de 2024, se reporta que el recibo de la energía eléctrica de la CFE para el acueducto fue de 300 millones de pesos. Supongamos que el recibo es bimestral por lo que al mes sería de la mitad. Por otro lado tenemos el volumen bombeado (corregido) en un mes de la pregunta 24. Podemos entonces calcular el costo de la energía por metro cúbico. El costo es de:

- a) 10 pesos b) 20 pesos
c) 30 pesos d) 40 pesos

29. En la nota de febrero de 2020 en Milenio se habla de una deuda de agua a EEUU de 220 millones de milímetros cúbicos (mm^3). ¿Cuánto es esta cantidad en litros?

- a) 0.220 litros b) 2.20 litros
c) 22 litros d) 220 litros

30. Si la deuda hubiera sido lo que se reportó en la nota de Milenio, los agricultores no habrían tomado la presa La boquilla para impedir que se utilizara para pagar la deuda. Cualquier agricultor, cualquiera, podría haber dicho yo la pago mañana, y cada quien para su casa. Lo que se quiso decir en la nota periodística era 220 millones de metros cúbicos 220 Mm^3 , no de milímetros cúbicos. Suponiendo que la deuda real se paga en un año, la cuestión es calcular el equivalente en un caudal en m^3/s . El caudal en m^3/s es:

- a) $7 \text{ m}^3/\text{s}$ b) $14 \text{ m}^3/\text{s}$
c) $21 \text{ m}^3/\text{s}$ d) $28 \text{ m}^3/\text{s}$

31. En 2020 se cerraba el segundo ciclo de cinco años donde no había opción sino saldar el remanente del total de la deuda de diez años. La deuda total de diez años era de 4,320 Mm³. Cada año se abonaba, de tal forma que al final de 2020 solo se debían los mencionados 220 Mm³. ¿Qué porciento era la deuda al final, del total de los diez años?

- a) 10% b) 15% c) 5% d) 2 %

32. En 2025 se cumple el primer ciclo de cinco años en que México debe entregar 2,160 Mm³. Antes de la entrega de los 150 Mm³ de la presa El Cuchillo se adeudaban 1,627 Mm³. ¿De cuánto es la deuda actual en Mm³?

- a) 1,277 Mm³ b) 1,477 Mm³
c) 1,577 Mm³ d) 1,677 Mm³

33. ¿Cuánta es la deuda actual en porcentaje del total que se debe pagar?

- a) 58% b) 68% c) 78% d) 88%

34. ¿Cuánto ha abonado México en porcentaje del total que se debe pagar?

- a) 42% b) 32% c) 22% d) 12%

35. En octubre de 2025 se debe terminar de pagar la deuda. Faltan de entregar muchos millones de metros cúbicos según la pregunta 32. Si la deuda se tuviera que pagar en seis meses: ¿Cuál sería el caudal equivalente en m³/s?

- a) 50 m³/s b) 75 m³/s
c) 100 m³/s d) 125 m³/s

36. Todavía queda otro ciclo de cinco años en que se puede aplazar el pago. El problema es que se acumula, ya debemos para finales de 2025 lo de la pregunta 32, a lo que habría que sumar lo que se acumule del 2026 al 2030 que es 2,160 Mm³. Si pagáramos todo distribuyendo la deuda en el año 2030: ¿Cuál sería el caudal equivalente en m³/s de un río fluyendo todo el año?

- a) 60 m³/s b) 80 m³/s
c) 100 m³/s d) 120 m³/s

37. En condiciones ideales con lluvias según el promedio de muchos años, lo más conveniente sería abonar según lo convenido por año, que es de 432 Mm³. ¿A cuánto equivaldría este volumen en un caudal en m³/s?

- a) 3.5 m³/s b) 7 m³/s
c) 14 m³/s d) 17.5 m³/s

38. Por la parte del río Colorado se le entrega a México 1,850 Mm³ anuales. ¿Por cada litro que entrega México a EEUU en el río Bravo, cuántos litros se reciben aproximadamente del río Colorado?

- a) 1 litro b) 2 litros
c) 3 litros d) 4 litros

39. Lo que recibe México del río Colorado equivale a un caudal de:

- a) 60 m³/s b) 40 m³/s
c) 20 m³/s d) 10 m³/s

40. Lo que se recibe al año en México se puede pensar como un río de ciertos m³/s de caudal. Lo que entrega México a EEUU sería otro río de otros m³/s de caudal. ¿Cuántas veces es el caudal que recibe México en comparación con el que entrega a EEUU:

- a) 5 veces b) 4 veces
c) tres veces d) dos veces

41. El agua que viene por el acueducto Colorado-Tijuana no puede distribuirse directamente a la población porque no es potable. Se necesita tratarla en una planta potabilizadora. Por otro lado, una planta potabilizadora no puede recibir tampoco directamente el agua del acueducto porque tiene sus propios tiempos de mantenimiento. Se necesita una presa entre el acueducto y la planta potabilizadora para regular el flujo. La presa que se construyó en 1978 con este propósito es la presa:

- a) Las Auras b) Morelos
c) El Carrizo d) Abelardo L Rodríguez

42. Cómo se llama la planta potabilizadora que entrega el agua del acueducto a Tijuana:

- a) La Gloria b) Tecate
c) El Florido d) Otay

43. Según la clasificación de los ríos que se discutió en la guía, el río Ganges es de categoría:

- a) 2 b) 3 c) 4 d) 0 5

44. El río Nilo es de categoría:

- a) 2 b) 3 c) 4 d) 0 5

45. El río Misisipi es de categoría:

- a) 2 b) 3 c) 4 d) 0 5

46. El río Amazonas es de categoría:

- a) 2 b) 3 c) 4 d) 0 5

47. El río Bravo es de categoría:

- a) 2 b) 3 c) 4 d) 0 5

48. El río Tijuana es de categoría:

- a) -1 b) 0 c) 1 d) 0 2

49. El río Colorado es de categoría:

- a) 2 b) 3 c) 4 d) 0 5

50. ¿Cuántos metros cúbicos se acumulan en un día con un caudal de $1 \text{ m}^3/\text{s}$?

- a) $86,400 \text{ m}^3$ b) $24,000 \text{ m}^3$
c) $36,000 \text{ m}^3$ d) $96,000 \text{ m}^3$

51. Imaginen un depósito que tiene una superficie de una hectárea. Puede ser $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$, o $50 \text{ m} \times 200 \text{ m}$. ¿A qué altura subiría aproximadamente el agua en un día si recibe $1 \text{ m}^3/\text{s}$?

- a) 9 cm b) 90 cm c) 9 m d) 18 m

52. Por lo general una cuenca tiene sub-cuencas y microcuencas que concentran agua en los ríos y arroyos afluentes de la corriente principal, formando un patrón que semeja un árbol. El río principal sería el tronco y los afluentes las ramas. Es el mismo patrón del sistema circulatorio que forman arterias y venas, y también las neuronas en el cerebro. A este patrón en la forma de árbol se le conoce como:

- a) dentrítico b) dentrífico
c) dendrítico d) denfrítico

53. Cuencas cuyas aguas desembocan en lagos, lagunas o salares, y no tienen comunicación fluvial al mar. Un ejemplo es la cuenca del lago de Pátzcuaro, en el estado de Michoacán. Estas cuencas cerradas también se conocen como:

- a) xenorreica b) endorreicas
c) criptorreicas d) exorreicas

54. Cuencas cuyo cauce principal descarga sus aguas en el mar. Las tres cuencas internacionales, la del Bravo, Colorado y río Tijuana son ejemplos de estas cuencas abiertas, también conocidas como:

- a) xenorreicas b) endorreicas
c) criptorreicas d) exorreicas

55. Cuencas cuyos escurrimientos son exclusivamente subterráneos, como en el caso de la península de Yucatán, que al no tener cauces superficiales definidos, sus cuencas se definen por sus escurrimientos subterráneos con sus decenas de cenotes. Estas cuencas subterráneas también se conocen como:

- a) xenorreicas b) endorreicas
c) criptorreicas d) exorreicas

56. No toda el agua que cae en una cuenca termina en el río, la mayor parte se evapora tanto directamente del suelo o a través de las plantas en lo que llaman evapotranspiración. Otra parte se infiltra al subsuelo y se acumula como agua subterránea en los acuíferos. Lo que termina en los ríos es alrededor del:

- a) 5% b) 10% c) 20% d) 50%

57. Tanto el río Bravo como el río Colorado, y también el Río Tijuana, estaban totalmente en territorio de la Nueva España. Una década después de la independencia, en 1832, las fronteras seguían igual por el tratado de Adams-Onís con EEUU. Tres años después, en 1835, Texas se declara independiente fijando su frontera sur unos 200 km al norte del río Bravo. O sea que seguían los tres ríos en territorio mexicano. Texas fijaba su frontera sur en el río:

- a) Arkansas b) Sabina
- c) Pecos d) Nueces

58. Derivado de la guerra con EEUU la frontera se corrió hacia el sur hasta el Río Bravo con el tratado de Guadalupe-Hidalgo de 1848, y se extendió además el territorio de EEUU hacia el oeste hasta California. En el tratado, la frontera norte de Sonora era el río:

- a) Mayo b) Sonora
- c) Gila d) Yaqui

59. Sin embargo, esto cambió con el tratado de la venta de La Mesilla en 1853 con lo que se estableció la frontera actual. El nombre mismo de La Mesilla sugiere que se trata de un territorio pequeño. Sin embargo, la región entre el río Gila y la frontera actual tiene un área mayor a la del estado de Baja California. La distancia media entre la frontera actual y el río Gila es aproximadamente de:

- a) 45 km b) 200 km c) 400 km d) 600 km

60. ¿Cómo es que Baja California se salvó de quedar aislada por tierra del resto de México? Se estuvo muy cerca. La clave es el punto donde el Río Gila desemboca en el Río Colorado. Este punto se defendió a toda costa como inamovible en la nueva frontera y así quedó finalmente. Sin embargo, los negociadores mexicanos al parecer tuvieron que aceptar que tanto al este como al oeste la frontera quedara más al sur de ese punto. Hacia el este se estableció que la frontera quedaría a una legua marina al sur de la parte más al sur del puerto de San Diego. O sea la actual Tijuana. ¿A cuánto equivale una legua marina?:

- a) 2.5 km b) 3.5 km c) 4.5 km d) 5.5 km

61. El río Gila tiene un caudal promedio de $170 \text{ m}^3/\text{s}$. Si queremos saber el volumen que se acumularía en un año, multiplicamos por el número de segundos que tiene un año. Si queremos el volumen de lo que llovió en la cuenca tenemos que multiplicar el volumen acumulado del río por 5, recordando que solo un 20 % de lo que llueve termina en el río. Ya tenemos el volumen de agua que llueve en la cuenca en un año. Por otro lado, sabemos que este volumen es el área de la cuenca multiplicada por el espesor de la lluvia acumulada en un año. El área de la cuenca del Gila es $150,000 \text{ km}^2$ y queremos saber el espesor de la lluvia acumulada en un año. Este espesor es de:

- a) 170 mm b) 270 mm c) 370 mm d) 470 mm

62. La presa Hoover o lago Mead tardó en llenarse 6 años con aguas del río Colorado, cuyo caudal es de $600 \text{ m}^3/\text{s}$. No era conveniente utilizar todo el caudal y tapar el río porque ya había muchos usuarios aguas abajo de la presa. El llenado se hizo de manera controlada utilizando solo parte del caudal. Para calcular el caudal que se utilizó necesitamos la capacidad de la presa la cual es de $35,000 \text{ Mm}^3$. ¿Qué caudal se utilizó?:

- a) $50 \text{ m}^3/\text{s}$ b) $100 \text{ m}^3/\text{s}$
- c) $150 \text{ m}^3/\text{s}$ d) $200 \text{ m}^3/\text{s}$

63. Si se hubiese utilizado el caudal completo ¿En cuánto tiempo se habría llenado?:

- a) 1 año b) 2 años c) 3 años d) 4 años

64. Las presas pueden contener menos o más agua de la que mueve el río en un año. Por ejemplo, si se utiliza todo el caudal y se llena en tres meses, habrá agua para solo tres meses si al año siguiente no llueve. Por el contrario, si se llena en tres años, habrá agua para tres años aunque ya no llueva. Es como tener tres años normales de lluvia guardados en la presa. ¿Cuántos años normales caben en el lago Mead?:

- a) 1 año b) 2 años c) 3 años d) 4 años

65. La presa Glen Canyon o lago Powell tiene una capacidad de 30,000 Mm³ y tardó en llenarse 17 años. El caudal utilizado fue de:

- a) 10 m³/s b) 20 m³/s
c) 40 m³/s d) 60 m³/s

66. La presa donde descarga el acueducto Colorado-Tijuana tiene una capacidad de 40 Mm³. A la presa llegan y salen 6,000 l/s. Si el acueducto dejara de alimentar a la presa y se siguiera extrayéndole la misma cantidad ¿Para cuántos días alcanzaría la reserva?

- a) 80 días b) 160 días
c) 320 días d) 640 días

67. Desalinizar 1,000 galones de agua de mar para hacerla potable cuesta 10 dólares. ¿Cuánto es en pesos por metro cúbico?

- a) 30 pesos b) 40 pesos
c) 50 pesos d) 60 pesos

68. El agua que lleva el río Tijuana en su tramo canalizado, aguas abajo de la presa Abelardo L. Rodríguez, es una mezcla de drenaje tratado con no tratado. Tratar esta agua para hacerla potable y comercializarla cuesta 5 dólares por 1,000 galones. ¿Cuánto es en pesos por metro cúbico?

- a) 15 pesos b) 20 pesos
c) 25 pesos d) 30 pesos

69. ¿Aproximadamente que fracción de la cuenca del río Tijuana queda en México?

- a) 1/4 b) 2/4 c) 1/2 d) 3/4

70. La presa Abelardo L. Rodríguez tiene una capacidad de 135 Mm³. Si la presa estuviera llena y se le extrajera la misma cantidad de agua que llega por el acueducto Colorado-Tijuana, la presa se vaciaría con el tiempo si no llueve. ¿Cuántos días tardaría en vaciarse?

- a) 60 días b) 160 días
c) 260 días d) 360 días

71. La respuesta correcta a la pregunta 22 es la diferencia de alturas entre las estaciones de bombeo en el acueducto Colorado-Tijuana. Necesitamos esta altura para calcular la energía que se necesita para subir los 6,000 litros de agua de estación a estación. Podemos utilizar la fórmula de la energía potencial $E=mga$, donde m es la masa del agua en kg, g es la aceleración de la gravedad en m/s² y a es la altura entre estación y estación. La energía para subir 1 litro es:

- a) 16.7 J b) 167 J c) 1,670 J d) 1.67 J

72. La fórmula de la energía no toma en cuenta el tiempo que se tarde en subir el litro de agua. Sin embargo, el tiempo es muy importante. Tijuana y Rosarito necesitan 6,000 litros cada segundo, y no cada 10 segundos, por ejemplo. Si fuera cada 10 segundos serían 600 litros por segundo. Insuficiente. Si queremos que las cosas sucedan 10 veces más rápido eso habría que pagarlo. La fórmula de la energía se divide entre el tiempo para tomar esto en cuenta. La división energía/tiempo mide la potencia. La unidad es el vatio o Watt (W) y equivale a 1J/1s=J/s. Esto significa que para elevar 1 litro de agua entre una estación y otra en un segundo se requiere una potencia de:

- a) 167 W b) 1,670 W
c) 16.7 W d) 1.67 W

73. Si sabemos la potencia para subir un litro por segundo, seis mil veces esta potencia se requerirá para subir 6,000 l/s. La potencia que se requiere para subir de estación a estación el caudal del acueducto es:

- a) 0.01 MW b) 1 MW
c) 0.1 MW d) 10 MW

74. Es conveniente escribir 1 MW = 1,000 × 1000W = 1,000 kW. Esto es, cambiar de unidades de MW a kW. ¿Cuál es la potencia que se requiere para subir de estación a estación el caudal del acueducto?

- a) 10,000 kW b) 1,000 kW
c) 100 kW d) 10 kW

75. La Comisión Federal de Electricidad (CFE) cobra la energía utilizada en unidades de kWh, la cual es la potencia multiplicada por las horas que se utilizó. Por ejemplo, un horno eléctrico de cocina que consume una potencia de 1 kW, si se utiliza por una hora consume 1 kWh. La CFE le pone precio al kWh, no al kW, el kW está disponible pero si no se utiliza no se cobra, y entre más tiempo se utilice más se cobra. La energía que se gasta por día (24 horas) para subir el caudal del acueducto de estación a estación es de:

- a) 240 kWh b) 24,000 kWh
- c) 2,400 kWh d) 240,000 kWh

76. Si el costo del kWh sin subsidio es 4 pesos, lo que habría que pagar por mes a la CFE por subir el caudal del acueducto de estación a estación sería de:

- a) 30 millones b) 3 millones
- c) 300 mil d) 30 mil

77. Lo anterior es el costo por mes por estación. Multiplicando por el número de estaciones el total por mes para subir la Rumorosa es:

- a) 1.8 millones b) 18 millones
- c) 180 millones d) 180 mil

78. Multiplicando por 12 para calcular el monto por un año resulta:

- a) 2,160 millones b) 216 millones }
- c) 21.6 millones d) 2.16 millones

79. ¿Y cuántos millones de metros cúbicos llegan a Tijuana en un año, si llegan $6 \text{ m}^3/\text{s}$?

- a) 180 mil b) 18 millones
- c) 1.8 millones d) 180 millones

80. Dividiendo los millones de pesos entre los millones de metros cúbicos obtenemos lo que andábamos buscando: el costo en energía eléctrica de subir un metro cúbico de agua a La Rumorosa. El costo es de:

- a) 1.20 pesos b) 12 pesos
- c) 6 pesos d) 20 pesos

81. En el siglo III llegaba agua a Roma a través de 11 acueductos que sumados tenían la longitud de 800 km. En promedio su longitud era más o menos la del Colorado-Tijuana, pero en ellos no se subía el agua sino que se bajaba por gravedad. El volumen total de agua que llegaba a Roma era de $1 \text{ m}^3/\text{día}$. ¿Cuánto recibía Roma comparado con lo que recibe Tijuana por el acueducto?

- a) igual b) la mitad
- c) un tercio d) el doble

82. Las presas pueden tener varias funciones. Una de ellas es la producción de energía eléctrica. Así como se requiere energía para vencer la gravedad al subir el agua, cuando baja por gravedad se le puede recuperar utilizando turbinas (abanicos) diseñadas para ello. El agua en la Rumorosa baja por gravedad a Tijuana casi al nivel del mar, o sea que en teoría se podría recuperar el 100% de la energía que se utilizó para subirla, por lo que el costo neto sería cero pesos. Sin embargo, el terreno no es el adecuado para hacerlo, aunque se podría utilizar un desnivel abrupto de aproximadamente 100 m que hay antes de descargar en la presa. Si se instalaran los equipos adecuados se podría recuperar parte de la energía que se utilizó para subir el agua. ¿Qué porcentaje se recuperaría en esos 100 m?:

- a) 1% b) 5% c) 10% d) 100%

83. El bordo de la presa La Boquilla en Chihuahua tiene una altura de 80 m, por lo que cuando está llena, los litros por segundo que se descarguen pueden producir un máximo de 25 MW de potencia. De hecho, la capacidad instalada para producir energía eléctrica es de 25 MW de potencia. Sin embargo, la presa casi nunca está llena por lo que la producción de energía es menor de la máxima instalada. Vamos a suponer que se descargan $15 \text{ m}^3/\text{s}$ y que estos pasan por las turbinas. Para calcular la potencia que se produce con ese caudal no necesitamos conocer la capacidad instalada porque esa es la máxima que se puede producir. Podemos utilizar la fórmula de la energía potencial entendida como potencia cuando la masa es masa por segundo. Recuerden que la masa debe estar en kg. La potencia generada sería de:

a) 2 MW b) 4 MW c) 8 MW d) 12 MW

84. Más que en los hogares en lo que más se utiliza el agua es en la agricultura. El promedio mundial es del:

a) 51% b) 55% c) 59% d) 70%

85. El promedio mundial del uso del agua en los hogares es del:

a) 1% b) 2% c) 3% d) 10%

86. En el caso del río Colorado el promedio del uso en hogares es mayor porque ciudades grandes que no están en su cuenca como Los Ángeles, San Diego y Tijuana dependen total o parcialmente del río. Suponiendo que una persona usa 300 l/día, calcular el volumen que usa en un año:

a) 40 m³ b) 100 m³
c) 365 m³ d) 36.5 m³

87. Se estima que 40 millones de personas dependen del río Colorado. Con la respuesta correcta a la pregunta anterior se puede calcular el volumen total que utilizan los 40 millones de personas en un año. El volumen es de:

a) 400 Mm³ b) 365 Mm³
c) 4,000 Mm³ d) 36.5 Mm³

88. El escurrimiento anual del río Colorado es ≈20,000 Mm³. Calcular el porcentaje del agua del río que usan los 40 millones de personas. El porcentaje es:

a) 11% b) 15% c) 20% d) 30%

89. ¿Qué porcentaje del escurrimiento del río Bravo se deja pasar permanentemente a su desembocadura en el Golfo de México?

a) 20% b) 15% c) 10% d) 5%

90. ¿Qué porcentaje del escurrimiento del río Colorado se deja pasar permanentemente a su desembocadura en el Mar de Cortés?

a) 15% b) 10% c) 5% d) 0%

91. A Baja California se le dan bien las potencias de diez en relación con el agua. El caudal del río imaginario “Baja California” es de:

a) 6×10^{-1} m³/s b) 6×10^0 m³/s
c) 6×10^1 m³/s d) 6×10^2 m³/s

92. El caudal del río Colorado es de:

a) 6×10^{-1} m³/s b) 6×10^0 m³/s
c) 6×10^1 m³/s d) 6×10^2 m³/s

93. El caudal que se le asigna a México del río Colorado es de:

a) 6×10^{-1} m³/s b) 6×10^0 m³/s
c) 6×10^1 m³/s d) 6×10^2 m³/s

94. El caudal del acueducto Colorado-Tijuana es de:

a) 6×10^{-1} m³/s b) 6×10^0 m³/s
c) 6×10^1 m³/s d) 6×10^2 m³/s

95. El caudal de la concesión en Mexicali a la planta cervecera que se canceló hace varios años era de:

a) 6×10^{-1} m³/s b) 6×10^0 m³/s
c) 6×10^1 m³ d) 6×10^2 m³/s

96. El agua virtual es la cantidad de agua que se necesita para obtener un producto. Se le llama virtual porque ya no está en el producto y no la vemos. También se le conoce como huella hídrica porque es el rastro que deja el producto y no está en el producto mismo. El promedio mundial de agua virtual per cápita es de 1,400 metros cúbicos por año. Por otro lado, si el consumo per cápita al día de agua en domicilios es de 200 litros, al año son ≈70 m³. Obviamente usamos más agua que no vemos que la que vemos. ¿Cuántas veces?

a) 2 b) 6 c) 12 d) 20

97. Canadá y EEUU son exportadores netos de agua virtual. Esto es, que exportan más de la que importan, principalmente en alimentos. México es un importador neto de agua virtual, principalmente por la importación de carnes y cereales. Por ejemplo, año con año importamos 20 millones de toneladas de maíz amarillo, principalmente para consumo animal en la producción de carne de res, cerdo, pollo, huevo y leche. Nos preguntamos por la cantidad de agua que se necesita para producir los 20 millones de toneladas de maíz. Una manera de calcularla es suponer una producción razonable de 10 toneladas por hectárea. Sabiendo esto podemos calcular el número de hectáreas de riego que se necesitan. Son 2 millones de hectáreas. Ahora necesitamos los metros cúbicos que se necesitan por hectárea. Una hectárea son tantos metros cuadrados por lo que nos falta la altura. El dato que necesitan es el de 1 m de altura para cultivar maíz. Por lo tanto, el agua que se necesita para producir los 20 millones de toneladas de maíz amarillo es de:

- | | |
|--------------------------|---------------------------|
| a) 20 Mm ³ | b) 200 Mm ³ |
| c) 2,000 Mm ³ | d) 20,000 Mm ³ |

98. La respuesta correcta a la pregunta anterior es aproximadamente el escurrimiento anual del río Colorado. En otras palabras, el equivalente de toda el agua del río Colorado, año con año se exporta a México como agua virtual en los 20 millones de toneladas de maíz amarillo. El escurrimiento anual del río Colorado es aproximadamente:

- | | |
|--------------------------|---------------------------|
| a) 20 Mm ³ | b) 200 Mm ³ |
| c) 2,000 Mm ³ | d) 20,000 Mm ³ |

99. De un kilogramo de carne de res pueden salir 20 tacos de carne asada. La huella hídrica de un kilogramo de carne de res es $\approx 16,000$ litros de agua. Calcular la huella hídrica de la carne en un taco, olvídense de la tortilla, guacamole y demás. ¿Cuántos tambos de 200 litros es la huella hídrica de la carne de res en un taco?:

- | | |
|-------------|-------------|
| a) 1 tambo | b) 2 tambos |
| c) 3 tambos | d) 4 tambos |

100. De un kilogramo de carne de puerco pueden salir 24 tacos de adobada. La huella hídrica de un kilogramo de carne de puerco es $\approx 4,800$ litros de agua. Calcular la huella hídrica de la carne en un taco, olvídense de las dos tortillitas, la salsa y la piña. ¿Cuántos tambos de 200 litros es la huella hídrica de la carne en un taco de adobada?:

- | | |
|-------------|-------------|
| a) 1 tambo | b) 2 tambos |
| c) 3 tambos | d) 4 tambos |

Agradecimientos

La logística del evento estuvo a cargo de Mario González Escobar, Humberto S. Benítez Pérez, Ana Karina Espinoza Villalva, Ángel Daniel Peralta Castro, Sergio Manuel Arregui Ojeda. En las mesas de divulgación y en los laboratorios colaboraron Luis Delgado Argote, Mario González Escobar, Efraín Gómez Arias, Javier Alejandro González Ortega, Claudio Inguaggiato, Oscar Alberto Castro Artola, Carlos Simón Reyes Martínez, Carlos Eduardo Reinoza Gómez, Jorge Olmos Soto, Jeremie Bauer así como Gabriel Rendón Marquez, Martín Francisco Pacheco Romero, Fernando Herrera Barrientos, Cristian Alejandro Gallegos Castillo, María Alejandra Nuñez Leal, Eduardo Rodríguez Orozco, Rogelio Arce Villa, María Margarita Martínez Rodríguez, Agustín Mastache Román, Luis Eduardo Ochoa Tinajero, Elvia Ramón Morales, Andrés Navarro Rodríguez, con el apoyo de los estudiantes de posgrado de diversos programas: Blanca Suhey Apolinar Morales, Jorge Daniel Castro Morales, Iván Barea Pérez, Ignacio Francisco García Meza, Nina Adhara Elena Ávila Ortiz. En la coordinación de recorridos, Ana Karina Espinoza Villalva, con la participación de los estudiantes del Programa de Posgrado de Ciencias de la Tierra: Marisol Juárez Reyes, Young Ho Aladro Chio, Andrea Rojo Díaz de León, Miriam S. Morales Infante, Beatriz Valdés Moreno, Yasmin Hernández Aburto, Luis alvarado, Diana Yareth Carmona, Ashley Natalie Vega Donato y Joel Aguilar Tomasini. En la coordinación de los recorridos de los maestros participo Martín Francisco Pacheco Romero.

Manuscrito recibido: 3 de junio de 2025
Manuscrito aceptado: 9 de junio de 2025