Rocío Fonseca-Aguiñaga, Walter M. Warren Vega y Luis A. Romero Cano

# Evaluación de la calidad del tequila

El tequila es reconocido como símbolo de la cultura mexicana. En el marco de la celebración del 30 aniversario del Consejo Regulador del Tequila (CRT) y la conmemoración de los 50 años de la Denominación de Origen del Tequila (DOT), con el fin de promover la cultura de la bebida nacional por excelencia, la presente comunicación tiene como objetivo presentar los avances científicos para la generación de un banco isotópico de la bebida como herramienta auxiliar para salvaguardar el tequila como bebida en el mundo.

## Introducción

El tequila es una bebida alcohólica cuya autenticidad se comprueba a través de una inspección permanente desde el origen del **agave** hasta la comercialización del producto realizada por el Consejo Regulador del Tequila (CRT) en las empresas productoras, inspección en la que se constata que el proceso de producción cumple con los lineamientos de la NOM-006-SCFI-2012. En esta norma se establecen las especificaciones para la producción de esta bebida, describiendo sus categorías y clases. De acuerdo con su categoría, se clasifica en dos: tequila 100 % agave y tequila.

**Agave**
Planta de la familia de las agaváceas, de hojas largas y fibrosas, de forma lanceolada, de color azulado, de la especie tequilana Weber variedad azul, cuya parte aprovechable para la elaboración de tequila es la piña o cabeza.

El *tequila 100 % agave* se define como un producto que no ha sido enriquecido con fuentes de azúcares distintas al *Agave tequilana* Weber variedad azul. Esta especie es la única permitida para la producción del tequila y debe cultivarse dentro del territorio que comprende la Denominación de Origen del Tequila (DOT), territorio conformado por 181 municipios cuya distribución se describe a continuación: los 125 de Jalisco, 30 de Michoacán, 11 de Tamaulipas, 8 de Nayarit y 7 de Guanajuato. El envasado del producto debe realizarse en una planta controlada por un **productor autorizado** y estar ubicada dentro del territorio comprendido en la DOT.

**Productor autorizado**
Persona física o moral que cuenta con autorización por parte de la Dirección General de Normas y del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial, conforme a sus respectivas atribuciones, para dedicarse a la elaboración de tequila dentro de sus instalaciones.

Ahora bien, la categoría de *tequila* corresponde a un producto en cuya formulación de mostos –líquido azucarado proveniente de la extracción del agave hidrolizado– pueden adicionarse otros azúcares conforme a la norma, sin exceder un 49 % de azúcares reductores totales en unidades masa; de modo que el 51 %

de los azúcares debe pertenecer a plantas de *Agave tequilana* Weber, variedad azul cultivadas dentro de la DOT. Para el caso de esta categoría, el envasado puede realizarse fuera de la DOT, pero debe cumplir con las especificaciones establecidas en la Norma Oficial Mexicana.

Por otro lado, existen cinco clases de tequila, que se distinguen principalmente por el tiempo de maduración al que ha sido sometida la bebida y se describen a continuación: *a) blanco*, producto que se obtiene de la destilación y al que se añade agua de dilución para el ajuste de la graduación alcohólica; *b) joven*, producto obtenido de la mezcla de tequila blanco, tequila reposado, tequila añejo o tequila extra añejo; *c) reposado*, producto que ha estado en contacto con madera de recipientes de roble o encino por un tiempo mínimo de dos meses; *d) añejo*, aquel que ha estado por un tiempo mínimo de un año en contacto con madera de recipientes de roble o encino teniendo una capacidad máxima de 600 L, y *e) extra añejo*, el que ha estado al menos tres años en maduración en recipientes de roble o encino con una capacidad máxima de 600 L.

**Banco de datos isotópico**
Base de datos que cuenta con la trazabilidad de cada muestra, determinando los valores isotópicos de carbono 13 y oxígeno 18, en el laboratorio del Consejo Regulador del Tequila, A. C., como una herramienta auxiliar para la calidad de la bebida.

## Isotopía en el tequila

De acuerdo con cifras del CRT, en 2025 se alcanzó un volumen de producción total de 559.36 millones de litros de tequila 100 % agave y tequila, con participación en mercados nacionales e internacionales. Esto refleja el creciente interés de los consumidores del mundo en el tequila y la necesidad de establecer técnicas analíticas auxiliares que puedan implementarse como controles de calidad a nivel internacional. Para lograr este objetivo, el 16 de marzo de 2016 se inauguró dentro de las instalaciones del CRT el Laboratorio de Isotopía con la finalidad de que, mediante el uso de un equipo de cromatografía de gases acoplado a un espectrómetro de masas de relaciones isotópicas, se determinaran los isótopos de carbono 13 ($\delta^{13}C_{VPDB}$) –donde VPDB alude a Vienna Peedee Belemnite, material de referencia que permite establecer una escala para su medición y oxígeno 18 ($\delta^{18}O_{VSMOW}$), en donde VSMOW es la escala a un material de referencia primario denominado Vienna Standard Mean Ocean Water–. El análisis de estos isótopos se realiza en ambas categorías del producto a fin de generar un **banco de datos isotópicos** del tequila, considerando también sus clases, con la finalidad de contar con una herramienta analítica complementaria a las actividades de inspección y certificación del CRT, y garantizar así la autenticidad del tequila. A continuación se presenta la infraestructura que se cuenta en el Laboratorio de Isotopía del CRT para llevar a cabo el análisis de bebidas alcohólicas (**Figura 1**).

Antes de referir los avances alcanzados en el Laboratorio de Isotopía del CRT, es importante explicar qué es un isótopo. De acuerdo con el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), un isótopo se defi-

**Figura 1.** Infraestructura del Laboratorio de Isotopía del Consejo Regulador del Tequila. Crédito de imágenes: Consejo Regulador del Tequila A. C.

ne como átomos pertenecientes a un mismo elemento químico (que cuentan con un número específico de protones y electrones en su núcleo), pero que pueden presentar diferencias en la cantidad de neutrones en su núcleo. Para realizar su medición, la notación utilizada es partes por mil (‰), debido a que la abundancia de los isótopos es relativamente pequeña.

La diferencia en el número de neutrones permite identificar el origen y las variaciones relacionadas con el proceso de elaboración de la bebida. Con esta metodología analítica, es posible determinar el origen del componente principal de cada bebida alcohólica, el etanol. La NOM-006-SCFI-2012 establece que el contenido alcohólico del tequila debe encontrarse entre 35-55 % de Alc. Vol., el cual se analiza mediante cromatografía de gases acoplado a la espectrometría de masas de relaciones isotópicas para determinar el "delta de carbono 13" ($\delta^{13}C$), parámetro que permite identificar si la fuente de azúcar empleada en la elaboración del tequila pertenece a una agavácea o a otra fuente, como la uva, la caña o el maíz. Este parámetro se correlaciona con el ciclo fotosintético de la planta. En la **Figura 2** se presenta un mapa mental de los tipos de plantas que hay de acuerdo con los mecanismos de asimilación de $CO_2$ en la fotosíntesis y ejemplos de éstas.

## Estudios de isotopía en tequila

Para el caso de tequila 100 % agave blanco, en estudios acotados a un número finito de muestras, considerando los productores autorizados activos al momento de la realización de los análisis y los procesos de producción utilizados, se ha encontrado que los valores de delta de carbono 13 ($\delta^{13}C$) en la molécula de etanol se han comportado en un rango de –12.00 a –13.50 ‰ (Fonseca-Aguiñaga y cols., 2020). Estudios posteriores evidenciaron que el parámetro $\delta^{13}C$ en las clases reposado (con por lo menos dos meses en barrica) y añejo (con por lo menos un año en barrica) no se ve afectado; sin embargo, se observa un enriquecimiento en la relación isotópica de oxígeno 18 ($\delta^{18}O_{VSMOW}$) en el etanol, por lo que este parámetro ha sido declarado como trazador del tiempo de maduración de la bebida, ya que se encuentra relacionado con la generación de compuestos volátiles, como ésteres, por reacciones de oxidación que ocurren dentro de la barrica (**Tabla 1**) (Fonseca-Aguiñaga y cols., 2021; Warren-Vega y cols., 2021).

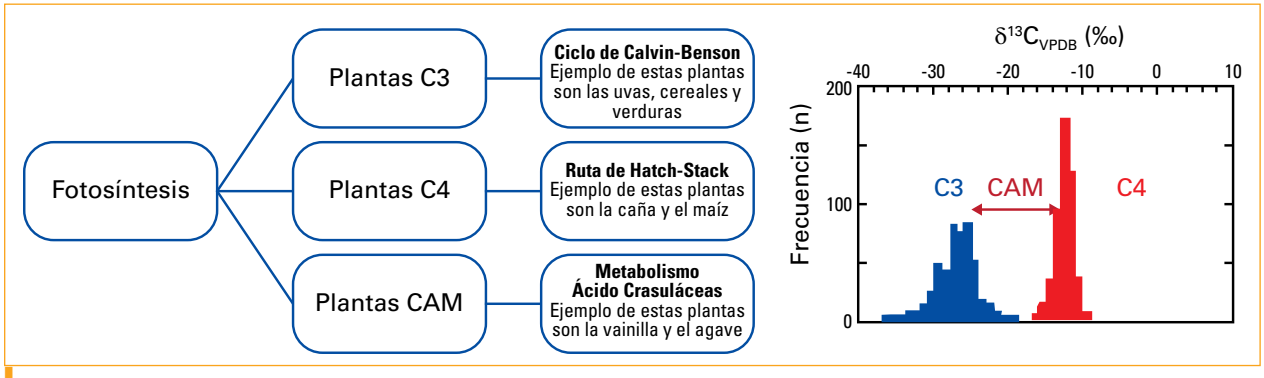


**Figura 2.** Mapa mental de los tipos de plantas presentes de acuerdo con su proceso de fotosíntesis. Para el caso de las plantas CAM (siglas en inglés de Crassulacean Acidic Metabolism), el intervalo está definido por las flechas.

**Tabla 1.** Parámetros analíticos auxiliares para determinar la autenticidad de la fuente de azúcar utilizada en la producción de etanol ($\delta^{13}C_{VPDB}$) y el tiempo de maduración de la bebida ($\delta^{18}O_{VSMOW}$).

| Bebida | $\delta^{13}C_{VPDB}$ (‰) | | | $\delta^{18}O_{VSMOW}$ (‰) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Mín. | Máx. | Prom. | Mín. | Máx. | Prom. |
| Tequila 100 % agave blanco | –13.38 | –12.30 | –12.84 | 17.38 | 21.66 | 19.52 |
| Tequila 100 % agave reposado | –13.25 | –12.43 | –12.84 | 18.65 | 22.43 | 20.54 |
| Tequila 100 % agave añejo | –13.20 | –12.52 | –12.86 | 19.42 | 23.48 | 21.45 |

Nota: Los valores isotópicos presentados aquí corresponden a análisis realizados en estudios previos (Fonseca-Aguiñaga y cols., 2020; Fonseca-Aguiñaga y cols., 2021).

Es importante mencionar que, dentro de la elaboración del tequila, una etapa fundamental es la cosecha de la materia prima, la cual se realiza seis o siete años después de la plantación del *Agave tequilana* Weber variedad azul, periodo en el que alcanza su completo desarrollo. Sin embargo, debido a las necesidades del mercado, en ocasiones se llegan a utilizar plantas de cuatro años.

A fin de estudiar la afectación de la edad del agave en el perfil del producto y su impacto en los controles de calidad, se evaluó este efecto dentro del Laboratorio de Isotopía del CRT. El estudio consistió en emplear diferentes edades del agave (cuatro a seis años) durante la elaboración de tequila 100 % agave blanco a escala industrial (Acosta-Salazar y cols., 2021). Se confirmó que no existen diferencias estadísticamente significativas en los valores de las relaciones isotópicas de carbono 13, ni en los parámetros fisicoquímicos (aldehídos, ésteres, metanol y alcoholes superiores) reglamentados en la norma, garantizando que es posible utilizar agave de diferentes edades.

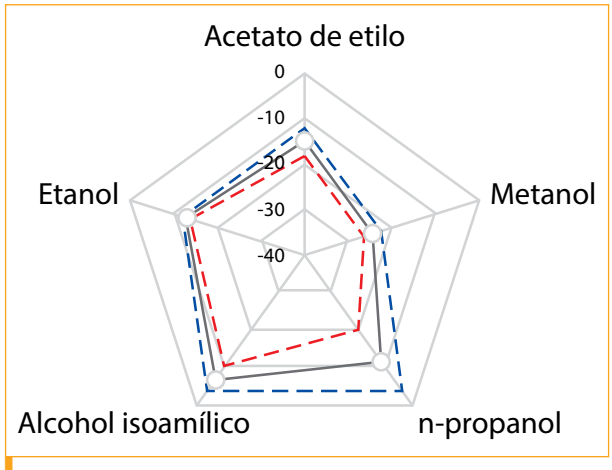


**Figura 3.** Huella isotópica de tequila 100 % agave blanco: $\delta^{13}C_{VPDB}$ (‰), - - - +2s, - - - –2s. Figura reproducida a partir de Fonseca-Aguiñaga y cols., 2023 (bajo licencia Creative Commons CC BY 4.0).

Por otra parte, es importante destacar que el tequila no es la única bebida alcohólica obtenida a partir de una especie de agave; existen otras bebidas en el mercado que paulatinamente se han ido posicionando en el gusto de los consumidores. Entre éstas destacan la raicilla, la bacanora y el mezcal, que, de acuerdo con sus respectivas normativas, poseen criterios específicos para su elaboración, como lo son la especie de agave permitida o el territorio geográfico en donde se pueden cultivar o producir. Debido a que todas las especies de agave poseen el mismo proceso fotosintético, se hace evidente la necesidad de buscar estrategias adicionales para identificar correctamente las bebidas, ya que todas ellas tendrán valores de $\delta^{13}C_{VPDB}$ similares.

Con la finalidad de diferenciar estas bebidas, el Laboratorio de Isotopía del CRT ha implementado la evaluación del $\delta^{13}C_{VPDB}$ en los compuestos congenéricos (como aldehídos, ésteres, alcoholes superiores y metanol) que conforman la bebida, los cuales se generan en cada una de las etapas del proceso de producción. Se tiene conocimiento de que las etapas de hidrólisis-extracción, fermentación y destilación impactan en el perfil de las bebidas, ya que cada industria tiene diferencias en sus procesos de elaboración: desde el uso de hornos de mampostería hasta el uso de columnas de barro. La caracterización isotópica de estos compuestos permitirá construir la huella isotópica del tequila (**Figura 3**) y evidenciar que las prácticas de producción empleadas repercuten en los isótopos de las moléculas, contribuyendo así a la definición de trazadores que distingan correcta-

mente el tequila y el tequila 100 % agave del resto de las bebidas espirituosas (Fonseca-Aguiñaga y cols., 2023).

## Conclusiones

El uso de la cromatografía de gases acoplada a la espectrometría de masas de relaciones isotópicas fortalecerá la evaluación del tequila y del tequila 100 % agave, así como sus respectivas clases, complementando las actividades que se realizan actualmente dentro del proceso de inspección del CRT, con lo cual se espera fortalecer el proceso de evaluación de la autenticidad de la bebida.

Esta técnica analítica, por otro lado, puede ofrecer evidencia científica que favorezca la protección del tequila frente a la competencia desleal con otras bebidas, permitiendo la defensa, mediante la información generada y almacenada en el CRT, de los productos de cada empresa.

**Rocío Fonseca-Aguiñaga**
Laboratorio de Isotopía, Consejo Regulador del Tequila, A. C.
rfonseca@crt.org.mx

**Walter M. Warren Vega**
Laboratorio de Isotopía, Consejo Regulador del Tequila, A. C.
wwarren@crt.org.mx

**Luis A. Romero Cano**
Grupo de Investigación en Materiales y Fenómenos de Superficie, Departamento de Biotecnológicas y Ambientales, Universidad Autónoma de Guadalajara.
luis.cano@edu.uag.mx

## Referencias

Acosta-Salazar, E., R. Fonseca-Aguiñaga, W. M. Warren-Vega, A. I. Zárate-Guzmán, M. A. Zárate-Navarro *et al.* (2021), "Effect of age of Agave tequilana Weber blue variety on quality and authenticity parameters for the tequila 100% agave silver class: Evaluation at the industrial scale level", *Foods*, 10(12):1-14. Disponible en: ‹https://doi.org/10.3390/foods10123103›.

Daya, P. (2022), "¿Qué es un isótopo?", OIEA [en línea]. Disponible en: ‹https://www.iaea.org/es/newscenter/news/que-es-un-isotopo›, consultado el 26 de febrero de 2026.

Fonseca-Aguiñaga, R., H. Gómez-Ruiz, F. Miguel-Cruz y L. A. Romero-Cano (2020), "Analytical characterization of tequila (silver class) using stable isotope analyses of C, O and atomic absorption as additional criteria to determine authenticity of beverage", *Food Control*, 112:107161. Disponible en: ‹https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107161›.

Fonseca-Aguiñaga, R., W. M. Warren-Vega, F. Miguel-Cruz y L. A. Romero-Cano (2021), "Isotopic characterization of 100% agave tequila (silver, aged and extra-aged class) for its use as an additional parameter in the determination of the authenticity of the beverage maturation time", *Molecules*, 26(6):1719. Disponible en: ‹https://doi.org/10.3390/molecules26061719›.

Fonseca-Aguiñaga, R., U. E. Navarro-Arteaga, M. Muñoz-Sánchez, H. Gómez-Ruiz, W. M. Warren-Vega y L. A. Romero-Cano (2023), "Design of a novel auxiliary diagnostic test for the determination of authenticity of tequila 100% agave silver class based on chemometrics analysis of the isotopic fingerprint of the beverage", *Foods*, 12(13):2605. Disponible en: ‹https://doi.org/10.3390/foods12132605›.

Warren-Vega, W. M., R. Fonseca-Aguiñaga, L. V. González-Gutiérrez, F. Carrasco-Marín, A. I. Zárate-Guzmán y L. A. Romero-Cano (2021), "Chemical characterization of tequila maturation process and their connection with the physicochemical properties of the cask", *Journal of Food Composition and Analysis*, 98. Disponible en: ‹https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.103804›.