TRIBU CERVECERA

CIENCIA CERVECERA · MATERIAL DE ESTUDIO

El amargor *en la altura*

Por qué tu cerveza amarga menos en Ciudad de México, Bogotá, Quito, Cusco o La Paz de lo que dice la calculadora, y cómo corregirlo con química.

92.4 °C
temperatura a la que hierve el agua en CDMX

52 %
velocidad del amargor frente a la del nivel del mar

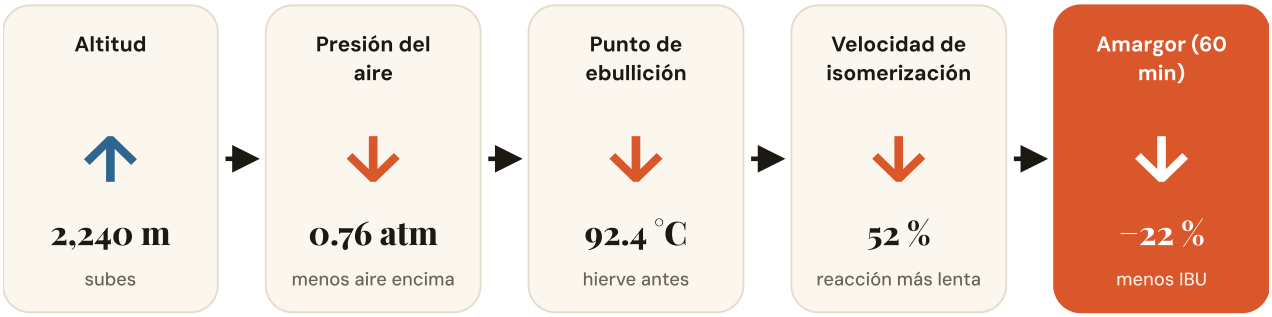
−22 %
IBU de un lúpulo de 60 min hervido en CDMX

Tribu Cervecera · noviembre de 2026

EN UN MINUTO

La idea completa en una cadena

Mientras más alto cocinas, menos aire tienes encima. Con menos presión, el agua hierve antes. Con el mosto más frío, la reacción que produce el amargor va más lenta. Y la calculadora, que supone 100 °C, te promete más IBU de los que obtienes.



Valores para Ciudad de México

Figura 1. Cada eslabón causa el siguiente. El resto del documento explica cada uno.

1 El problema
2 La química del amargor
3 La fórmula de Tinseth
4 Por qué el agua hierve antes
5 Por qué la reacción se frena
6 La fórmula corregida
7 Qué hacer en tu cocina

1 · EL PROBLEMA

La calculadora supone que cocinas en la playa

Las calculadoras de recetas (Brewfather, BeerSmith, Brewer's Friend) estiman el amargor con la fórmula de Glenn Tinseth, de 1997. Es una buena fórmula, pero trae una suposición escondida: que el mosto hierve a 100 °C.

Eso solo es cierto al nivel del mar. Conforme subes, el agua hierve a menor temperatura y la reacción química que produce el amargor se vuelve más lenta. **Si cocinas en la altura, tu cerveza sale menos amarga de lo que dice la calculadora.** En CDMX la diferencia es de 20 % o más: una IPA calculada en 60 IBU se siente como una de 45 a 50.

CIUDAD	ALTITUD	HIERVE A	VELOCIDAD DEL AMARGOR	IBU A 60 MIN
Nivel del mar	0 m	100.0 °C	**100 %**	—
Lima	150 m	99.5 °C	**96 %**	-1 %
Monterrey	540 m	98.2 °C	**86 %**	-4 %
Santiago de Chile	570 m	98.1 °C	**85 %**	-4 %
Guadalajara	1,560 m	94.7 °C	**63 %**	-14 %
Puebla	2,135 m	92.8 °C	**53 %**	-21 %
CDMX	2,240 m	92.4 °C	**52 %**	-22 %
Arequipa	2,335 m	92.1 °C	**50 %**	-23 %
Bogotá	2,600 m	91.2 °C	**46 %**	-26 %
Toluca	2,660 m	91.0 °C	**45 %**	-27 %
Quito	2,850 m	90.3 °C	**43 %**	-29 %
Cusco	3,400 m	88.4 °C	**36 %**	-36 %
La Paz	3,640 m	87.6 °C	**34 %**	-39 %
Puno	3,830 m	87.0 °C	**32 %**	-42 %
El Alto	4,050 m	86.2 °C	**29 %**	-44 %

EN CORTO

- El 100 °C de la calculadora solo aplica al nivel del mar.
- Entre más alto, más se aleja el cálculo de la realidad.

2 · LA QUÍMICA DEL AMARGOR

Del lúpulo a la iso-humulona

El amargor no viene directamente del lúpulo: viene de una transformación química que ocurre en la olla.

ALFA ÁCIDOS

Compuestos de la resina de las glándulas de lupulina. Los principales son la humulona, la cohumulona y la adhumulona, que solo difieren en una cadena lateral. Casi no son amargos y se disuelven muy poco en el mosto: a su pH (cerca de 5.2) están mayormente en su forma no disociada, poco soluble en agua.

ISOMERIZACIÓN

Reacción en la que una molécula se reacomoda en otra con exactamente los mismos átomos pero con otra estructura. Las dos son *isómeros*: misma fórmula molecular, distinta forma.

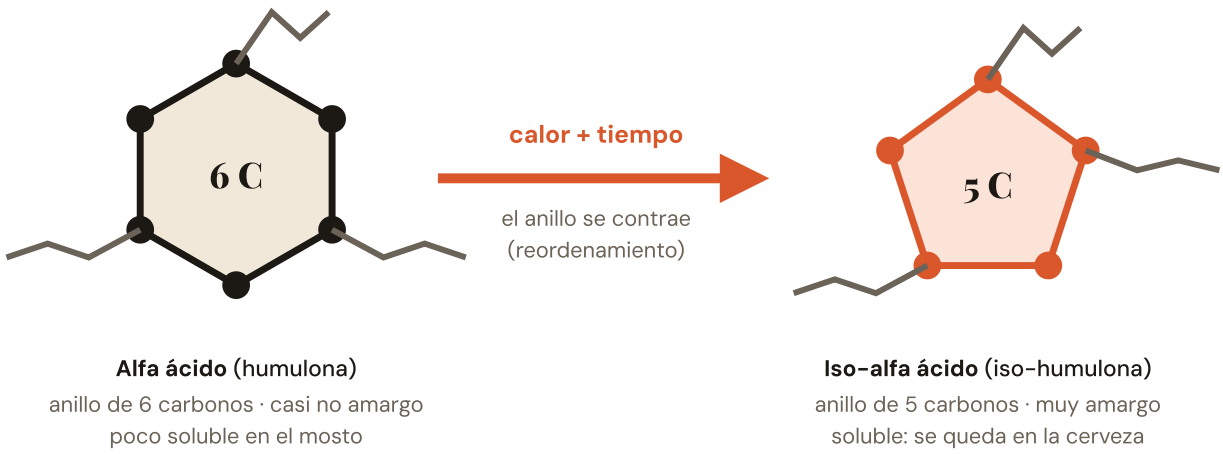


Figura 2. Esquema simplificado. Con el calor, el anillo de seis carbonos del alfa ácido se contrae a un anillo de cinco: nace el iso-alfa ácido, la molécula amarga.

El producto, el **iso-alfa ácido**, existe en dos variantes, *cis* y *trans*, según hacia qué lado del anillo quedan sus cadenas. Es intensamente amargo y más ácido que el alfa ácido (pKa cercano a 3): al pH del mosto está disociado y se disuelve bien. Es el responsable de casi todo el amargor de la cerveza.

IBU

International Bitterness Units. Un IBU equivale aproximadamente a 1 mg de iso-alfa ácidos por litro de cerveza. Se mide extrayendo la cerveza con un solvente y leyendo la absorbancia de luz ultravioleta a 275 nm.

UTILIZACIÓN

El porcentaje de los alfa ácidos que pones en la olla que termina en la cerveza como iso-alfa ácidos. Casi nunca pasa de 30 %: el resto no reacciona, se degrada o se pierde con el trub y la levadura.

EN CORTO

- El amargor es una reacción química: alfa ácido → iso-alfa ácido.
- Calcular IBU es estimar qué fracción reacciona: la utilización.

3 · LA FÓRMULA DE TINSETH

Dos factores y dos constantes

$$\text{IBU} = \text{Utilización} \times \text{mg/L de alfa ácidos}$$

$$\text{Utilización} = \underbrace{1.65 \times 0.000125^{(\text{densidad} - 1)}}_{\text{Factor densidad}} \times \underbrace{(1 - e^{-0.04 \times \text{min}}) \div 4.15}_{\text{Factor tiempo}}$$

El factor de tiempo

REACCIÓN DE PRIMER ORDEN

Aquella cuya velocidad es proporcional a la concentración de un solo reactivo. Si hay el doble de alfa ácido sin reaccionar, se transforma el doble por minuto. Conforme el reactivo se agota, la reacción se frena sola.

Eso produce una curva que sube rápido y luego se aplana: $1 - e^{-k \cdot t}$. En Tinseth, **k = 0.04 por minuto**: la **constante de velocidad**, el número que dice qué tan rápido ocurre la reacción. Retenla: es la pieza que la altitud modifica.

El **4.15** es el techo. Aunque hirvieras para siempre, la utilización no llegaría a 100 %: mientras se forman, los iso-alfa ácidos también se degradan, se adhieren a la proteína que coagula y se van con la espuma. Tinseth ajustó ese número a mediciones de laboratorio y pedía que cada cervecero lo recalibrara para su equipo.

El factor de densidad

En un mosto más denso, el mismo lúpulo da menos amargor: hay más azúcares y proteínas en solución, baja la solubilidad de los alfa ácidos y se pierde más con el trub. El 1.65 hace que el factor valga 1 cerca de 1.057; el 0.000125 controla qué tan rápido cae.

DENSIDAD	FACTOR
1.040	1.15
1.050	1.05
1.060	0.96
1.080	0.80
1.100	0.67

Por qué no incluye la altitud

La fórmula es **empírica**: no se dedujo de la química, se obtuvo ajustando curvas a mediciones reales hechas casi todas a unos 100 °C. Como la temperatura no variaba en los datos, no podía aparecer como variable: quedó escondida dentro del 0.04. Además, en 1997 no había mediciones de cómo cambia la isomerización con la temperatura; llegaron en 2005.

IDEA CLAVE

Una fórmula empírica solo convierte en variables las cosas que variaron en sus datos. Lo que fue constante al medir queda como constante en la fórmula.

4 · LA FÍSICA DE LA EBULLICIÓN

Por qué el agua hierve antes en la altura

PRESIÓN DE VAPOR

La presión que ejercen las moléculas que escapan de un líquido hacia el gas. Crece con la temperatura.

PUNTO DE EBULLICIÓN

La temperatura a la que la presión de vapor del líquido iguala a la presión atmosférica que tiene encima.

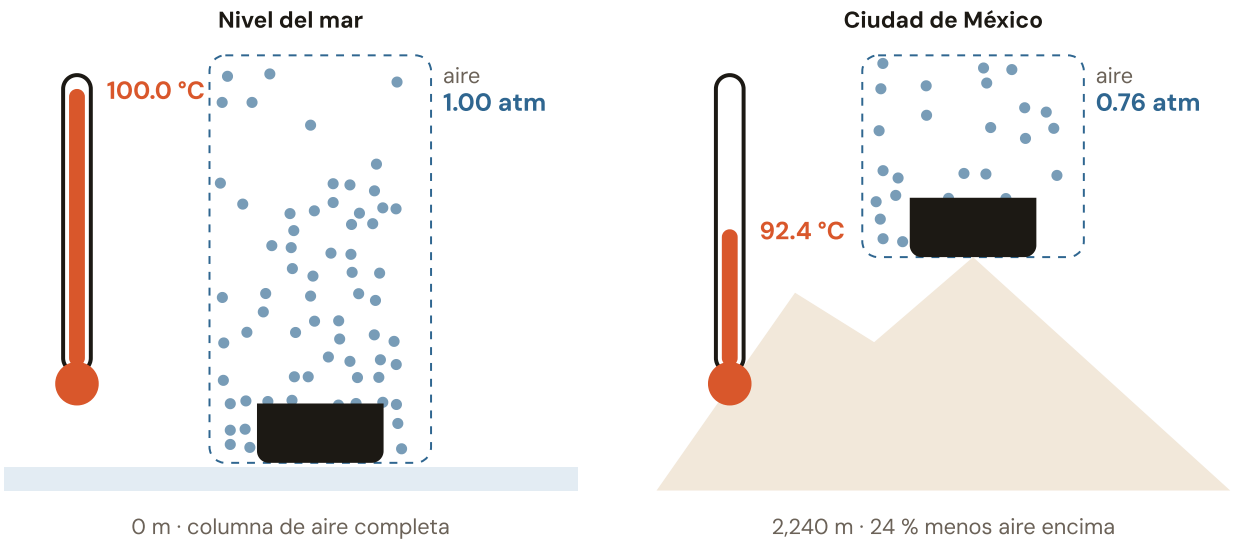


Figura 3. En la montaña hay menos aire encima de la olla. Con menos presión que vencer, el agua hierve a menor temperatura.

a **La presión según la altitud.** Fórmula barométrica de la atmósfera estándar:

$$P = (1 - 2.25577\times10^{-5} \times h)^{5.25588}$$

P en atmósferas, h en metros

En CDMX (2,240 m) da 0.76 atm: 24 % menos aire encima que en la playa.

b **La temperatura de ebullición a esa presión.** Ecuación de Clausius-Clapeyron:

$$1/T = 1/373.15 - (R / \Delta H_{vap}) \times \ln P$$

- **T** en kelvin (K = °C + 273.15): la termodinámica usa temperatura absoluta.
- **R** = 8.314 J/(mol·K), la constante universal de los gases.
- ΔH_{vap} = 40,660 J/mol, la **entalpía de vaporización** del agua: la energía para convertir un mol de líquido en vapor.
- Como P < 1, ln P es negativo: 1/T crece y T baja.

CALCULADO PARA CDMX

$\ln(0.76) = -0.273$

$(8.314 \div 40{,}660) \times 0.273 = 0.0000558$

$1/T = 0.0026799 + 0.0000558 = 0.0027357$

$T = 365.5\ K = 92.4\ °C$

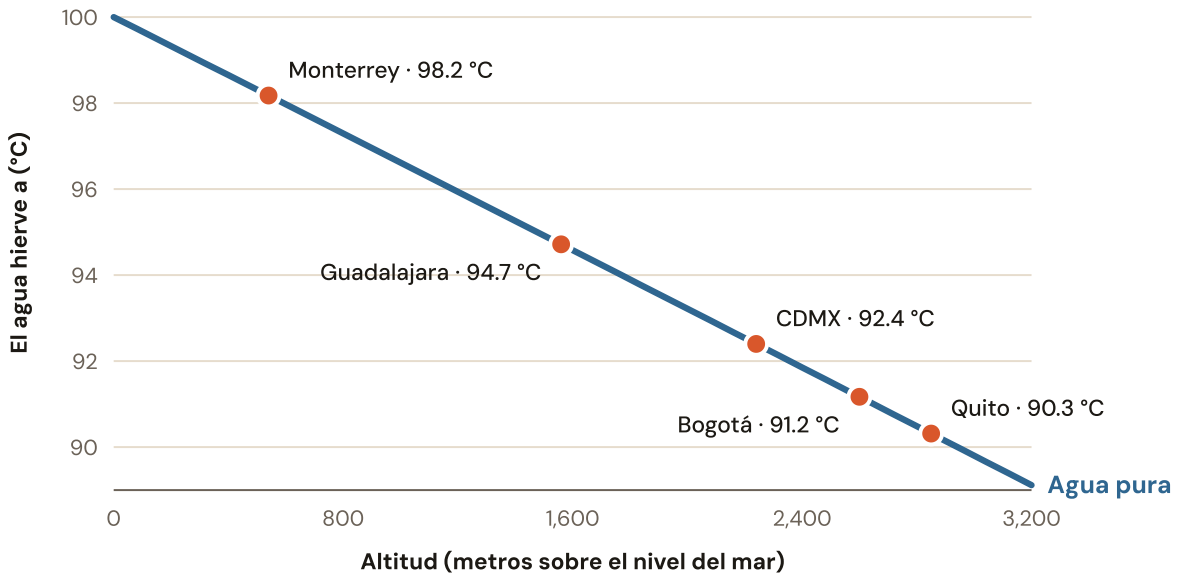


Figura 4. Temperatura de ebullición del agua según la altitud: se pierde aproximadamente 1 °C por cada 300 m.

EN CORTO

- Menos aire encima → menos presión → el agua hierve antes.
- En CDMX, a 92.4 °C; en Bogotá, a 91.2 °C.

5 · LA CINÉTICA QUÍMICA

Por qué unos grados frenan tanto la reacción

Bajar de 100 a 92 °C es solo un 8 %, pero la isomerización cae casi a la mitad. Para entender por qué hay que hablar de energía.

ENERGÍA DE ACTIVACIÓN (EA)

La energía mínima que necesita una molécula para reaccionar. Para volverse iso-alfa ácido, el alfa ácido tiene que pasar por una configuración muy inestable, el *estado de transición*, más alta en energía que el reactivo y que el producto.

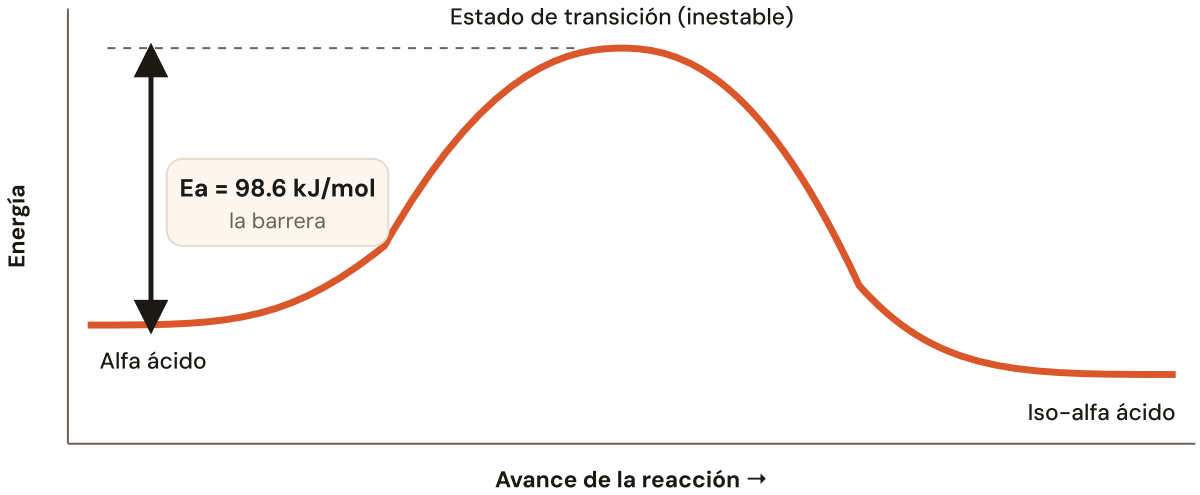


Figura 5. Perfil de energía de la isomerización. Solo las moléculas que suben la barrera Ea se convierten en iso-alfa ácido.

DISTRIBUCIÓN DE MAXWELL-BOLTZMANN

En un líquido, las moléculas no tienen todas la misma energía: la mayoría está cerca del promedio y unas pocas tienen mucha más. Al bajar la temperatura, toda la distribución se corre a la izquierda y la cola de moléculas muy energéticas se adelgaza mucho.

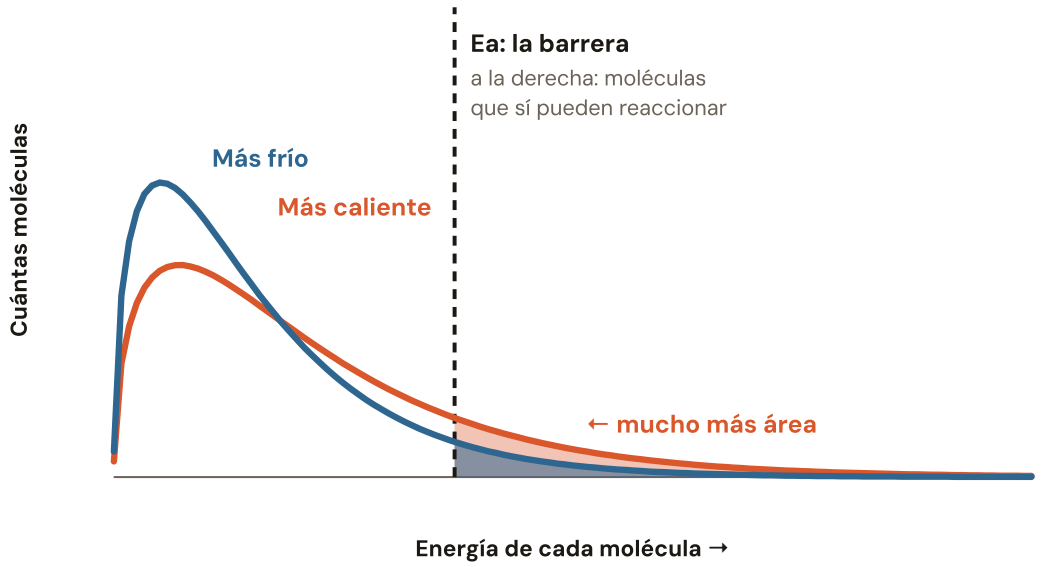


Figura 6. Esquema de la distribución de energías a dos temperaturas. El área sombreada a la derecha de la barrera son las moléculas que pueden reaccionar: con un poco menos de temperatura, esa área se reduce mucho más que el promedio.

De ahí sale la **ecuación de Arrhenius** (Svante Arrhenius, 1889):

$$k = A \times e^{-Ea\ /\ RT}$$

- **k**: la constante de velocidad. El 0.04 de Tinseth es una k medida a 100 °C.
- **A**: el factor de frecuencia, qué tan seguido las moléculas intentan reaccionar con la orientación correcta.
- $e^{-Ea/RT}$: la fracción de intentos con energía suficiente. Como T está dentro de un exponencial, pequeños cambios de temperatura dan grandes cambios de velocidad.

El cálculo sin conocer A

No conocemos A, pero no hace falta: si dividimos la k de CDMX entre la k a 100 °C, A se cancela.

$$k(92.4\ °C) \div k(100\ °C) = e^{-(Ea/R) \times (1/T_1 - 1/T_0)}$$

La energía de activación la midieron Malowicki y Shellhammer en la Universidad Estatal de Oregón (2005): **98.6 kJ/mol**, en un mosto modelo a pH 5.2, entre 90 y 130 °C.

CALCULADO PARA CDMX

$$Ea \div R = 98{,}600 \div 8.314 = 11{,}860\ K$$

$$1/365.5 - 1/373.15 = 0.0000558$$

$$11{,}860 \times 0.0000558 = 0.662$$

$$e^{-0.662} = 0.52 \rightarrow \text{la reacción va a 52 \% de su velocidad}$$

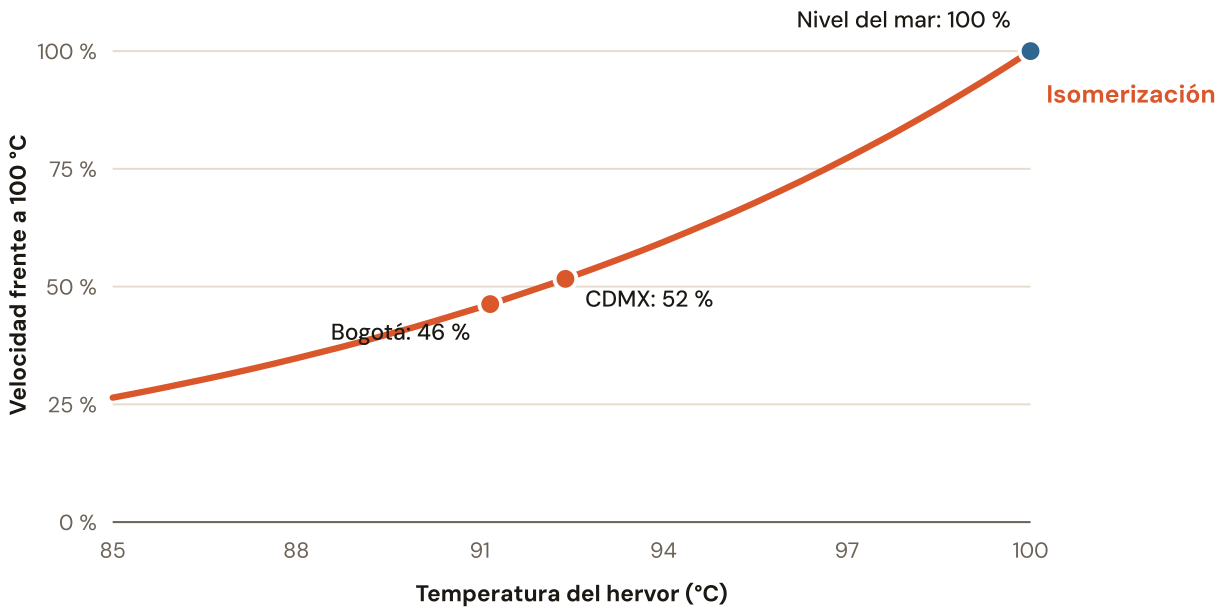


Figura 7. Velocidad de la isomerización frente a la que tendría a 100 °C (Arrhenius, Ea = 98.6 kJ/mol).

EN CORTO

- Solo reaccionan las moléculas que superan la barrera Ea.
- Esa fracción cae exponencialmente al bajar la temperatura.
- En CDMX la isomerización va a 52 % de su velocidad al nivel del mar.

6 · JUNTAR TODO

La fórmula de Tinseth corregida

La corrección es multiplicar la constante de velocidad por el factor de Arrhenius. En CDMX, 0.04 × 0.52 = 0.021 por minuto:

$$\text{Factor tiempo} = (1 - e^{-0.04 \times 0.52 \times \text{min}}) \div 4.15$$

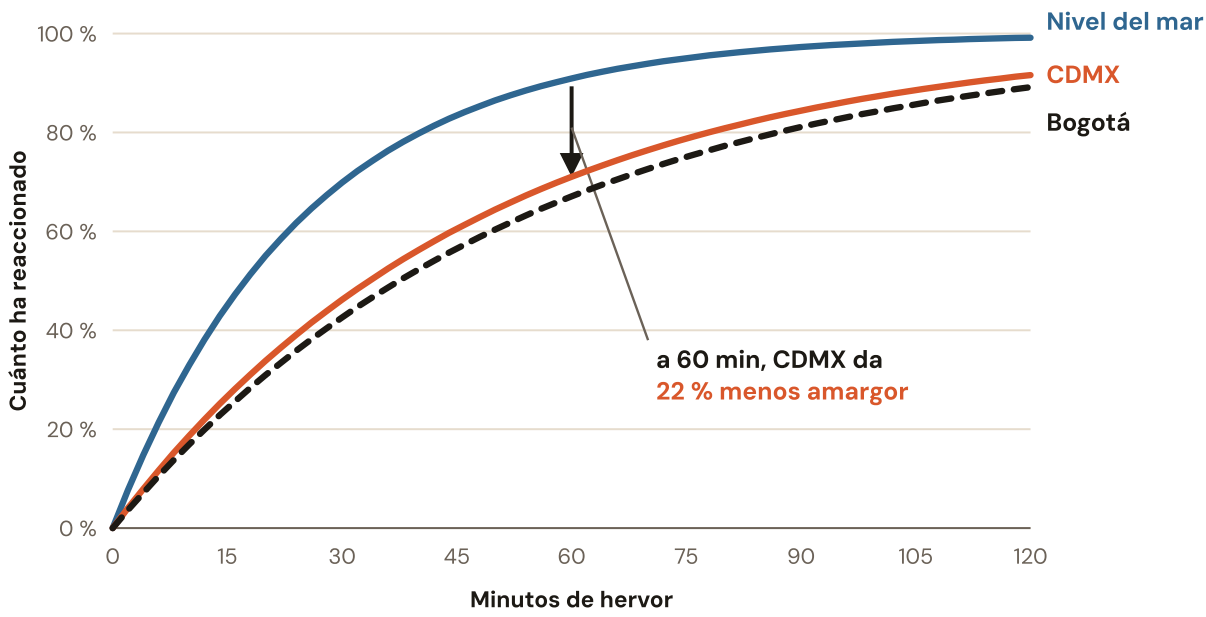


Figura 8. Cuánto alfa ácido ha reaccionado según el tiempo de hervor. Las curvas de altura suben más despacio.

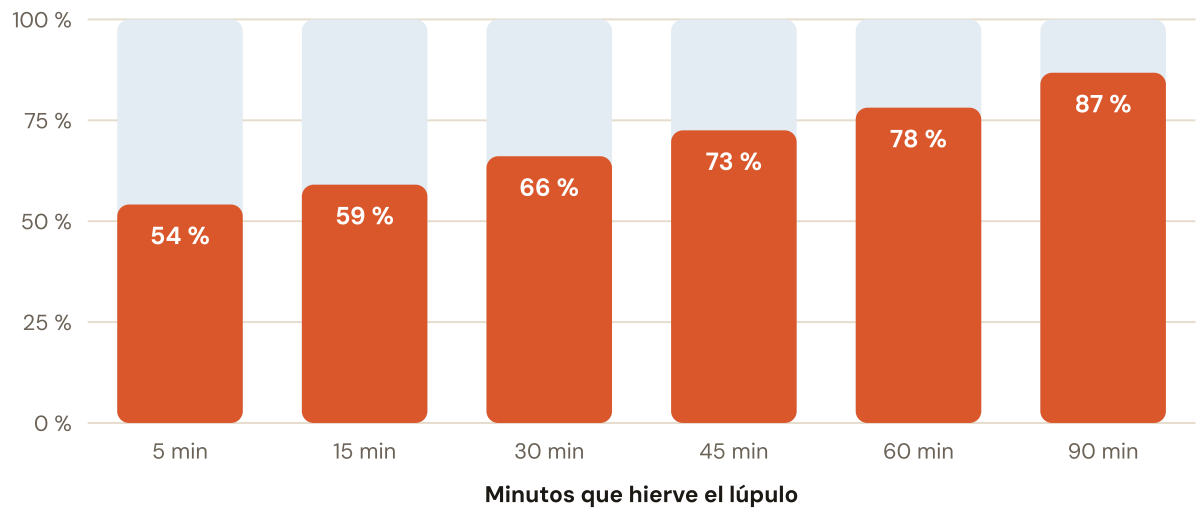


Figura 9. Lo que rinde en CDMX cada adición frente a la misma adición al nivel del mar (fondo azul = 100 %).

LÚPULO HIERVE	NIVEL DEL MAR	CDMX	RINDE EN CDMX
5 min	18 %	10 %	**54 %**
15 min	45 %	27 %	**59 %**
30 min	70 %	46 %	**66 %**
45 min	83 %	61 %	**73 %**
60 min	91 %	71 %	**78 %**
90 min	97 %	84 %	**87 %**

Por qué el lúpulo largo pierde menos

A 90 minutos, al nivel del mar casi todo el alfa ácido ya reaccionó: la curva está plana. En la altura la reacción va más lenta pero tiene tiempo de alcanzarla. En una adición corta nunca se acerca al techo, y la menor velocidad se nota completa.

Un ejemplo

28 g de un lúpulo al 10 % de alfa ácidos, 60 minutos de hervor, 20 litros, densidad 1.050:



Figura 10. La misma receta en tres ciudades. Para llegar a 32.3 IBU en CDMX harían falta unos 36 g en lugar de 28.

7 · EN LA PRÁCTICA

Qué hacer si cocinas en la altura

Corrige el cálculo 1

En el Taller de la app de Tribu Cervecera pon tu altitud en el equipo del diseñador de recetas («Altitud donde cocinas») y guárdala con «Guardar mi equipo». Tus recetas y copias la usarán. La calculadora de amargor también tiene el campo.

Sube los gramos de amargor 2

Es la palanca más predecible para llegar a tus IBU.

Alarga el hervor 3

La reacción tiene más tiempo para avanzar. A 90 minutos la pérdida en CDMX baja a ~13 %.

Las adiciones tardías sufren menos 4

Al final del hervor y en el whirlpool buscas sobre todo los aceites esenciales (aroma), no la isomerización.

El whirlpool tiene techo 5

En Bogotá no hay whirlpool a 95 °C: el mosto no llega ahí.

Lo que el modelo no captura

- **La degradación también se frena.** Malowicki y Shellhammer midieron 108 kJ/mol para la degradación de iso-alfa ácidos, más que para su formación. En la altura también se pierden más despacio, así que la corrección puede exagerar un poco la pérdida, sobre todo en hervores largos.
- **El hervor es menos vigoroso**: hay menos pérdida por espuma y trub. No hay datos para cuantificarlo.
- **Ea se midió en un mosto modelo**, no en mosto real. Un error de 10 % en Ea mueve el 0.52 a ~0.48–0.55.
- **La validación definitiva** es medir en laboratorio los IBU de una cerveza hecha en la altura y compararlos con el cálculo.

GLOSARIO

Alfa ácidos
Compuestos de la resina del lúpulo (humulona, cohumulona, adhumulona); precursores del amargor.

Constante de velocidad (k)
Número que indica qué tan rápido ocurre una reacción a una temperatura dada.

Energía de activación (Ea)
Energía mínima que necesitan las moléculas para reaccionar.

Entalpía de vaporización
Energía necesaria para evaporar un mol de líquido.

Isomerización
Reacomodo de una molécula en otra con los mismos átomos y distinta estructura.

Kelvin
Escala de temperatura absoluta; 0 K es el cero absoluto. K = °C + 273.15.

Presión de vapor
Presión que ejercen las moléculas que escapan de un líquido.

Reacción de primer orden
Reacción cuya velocidad es proporcional a la concentración de un reactivo.

Utilización
Fracción de los alfa ácidos añadidos que termina en la cerveza como iso-alfa ácidos.

FUENTES

1. Tinseth, G. (1997). *Glenn's Hop Utilization Numbers.* realbeer.com/hops/research.html
2. Malowicki, M. G. y Shellhammer, T. H. (2005). Isomerization and Degradation Kinetics of Hop (*Humulus lupulus*) Acids in a Model Wort-Boiling System. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(11), 4434–4439.
3. Arrhenius, S. (1889). Über die Reaktionsgeschwindigkeit bei der Inversion von Rohrzucker durch Säuren. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 4, 226–248.
4. Atmósfera estándar internacional (ISO 2533:1975), fórmula barométrica.

Tribu Cervecera
Ciencia cervecera para cocinar mejor