



# Caso práctico de cálculo del caudal de disolvente mínimo en operaciones de extracción sólido- líquido

<b>Apellidos, nombre</b>	Betoret Valls, Noelia (noebeval@tal.upv.es) Castelló Gómez, Marisa (mcasgo@upv.es)
<b>Departamento</b>	Departamento de Tecnología de Alimentos
<b>Centro</b>	Universitat Politècnica de València



## 1 Resumen

En este artículo vamos a presentar algunos ejemplos de **cómo obtener la cantidad de disolvente mínima** ( $E_{0min}$ ) necesaria para llevar a cabo un proceso de extracción sólido-líquido. Para ello, será necesario conocer la solubilidad del soluto en el disolvente, así como la capacidad de retención de fase líquida que tiene la corriente sólida o refinado con el que vamos a trabajar.

## 2 Introducción

Establecer las condiciones adecuadas para el manejo de las corrientes involucradas en cualquier operación básica es crucial para realizarla con éxito. En el caso de la extracción sólido-líquido, donde se ponen en contacto una corriente de fase sólida inicial ( $R_0$ ) con una corriente de fase líquida o disolvente inicial ( $E_0$ ), se produce una transferencia de materia de un componente o componentes (soluto: S) desde la fase sólida hasta la líquida. La composición en soluto del refinado ( $R_n$ ) y del extracto ( $E_i$ ) de salida dependerá fundamentalmente de:

- la relación de caudales entre las dos corrientes ( $R_0/E_0$ )
- del número de etapas de extracción
- del tipo de contacto considerado; simple, múltiple, con disolvente nuevo en cada etapa, o con circulación en condiciones de contracorriente

Debido a que el soluto es el único componente que puede transferirse de la corriente sólida a la corriente líquida, a lo largo del proceso se considerarán los cambios de composición asociados a tres componentes: soluto (S), disolvente (D) e inertes (I).

## 3 Objetivos

Una vez que te leas con detenimiento este documento, serás capaz de:

- **Estimar la cantidad mínima de disolvente necesaria** para conseguir un determinado nivel de extracción en una operación de extracción sólido-líquido

Si no estás muy familiarizado con la metodología de cálculo de la extracción sólido-líquido, te recomendamos que consultes las referencias citadas al final de este documento.

## 4 Desarrollo

El uso excesivo de disolvente inicial puede suponer una reducida concentración del soluto de interés en la corriente de extracto final ( $E_i$ ) y un sobrecoste de producción. Por otro lado, si utilizamos una cantidad demasiado pequeña de disolvente, este podría quedar totalmente retenido por la fase sólida no lográndose la extracción deseada. En consecuencia, en el diseño de procesos de extracción sólido-líquido es muy importante calcular la cantidad de disolvente mínima ( $E_{0min}$ ) necesaria para que el proceso pueda llevarse a cabo de forma efectiva.



Podemos definir la cantidad de disolvente mínima necesaria para llevar a cabo un proceso de extracción, como aquella cantidad de disolvente o corriente líquida que debe introducirse en el proceso para asegurar que todo el soluto contenido en la fase sólida se disuelve en la fase líquida y que, además, esta fase líquida no queda en su totalidad retenida por la fase sólida o refinado.

**¿Cómo podemos averiguar  $E_{0min}$ ?** A partir de la solubilidad del soluto en el disolvente y/o de la capacidad de retención de disolución, fase líquida, o disolvente que tiene el sólido, fase sólida, o refinado que estamos manejando.

Como lo mejor es ponernos en situación, vamos a ver un ejemplo.

Una industria azucarera realiza el proceso de extracción de azúcar de remolacha en dos etapas utilizando agua como disolvente nuevo en cada una con un caudal un 50% superior al mínimo. El refinado en el equilibrio cumple siempre la condición disolución/inerte = 2,5. Si se pretende trabajar con 84,5 kg/h de remolacha deshidratada que contiene un 60% de sólidos y 5% de agua, **¿cuál sería la cantidad de agua necesaria en cada etapa y el rendimiento de la extracción?**

Nota: Concentración de saturación del azúcar en agua: 60%

En este ejemplo el componente soluto será el azúcar y el disolvente será el agua. Todo lo que no sea azúcar o agua se considerará como inerte. A continuación, se detallan los pasos a seguir para resolver el caso práctico.

**1º Ubicar en el diagrama** triangular-rectangular **los puntos que representan las composiciones de las corrientes de entrada de refinado o corriente sólida ( $R_0$ )** (en este caso la remolacha azucarera) **y de disolvente inicial ( $E_0$ )** (Figura 1) y unirlos. Para ello, a partir de la composición de dichas corrientes, obtendremos las fracciones másicas de soluto ( $x_{S0}$ ,  $y_{S0}$ ) y de disolvente ( $x_{D0}$ ,  $y_{D0}$ ) de  $R_0$  y  $E_0$ , respectivamente. En este caso, en la remolacha deshidratada tenemos  $x_{S0}=0,60$  kg de azúcar/kg y  $x_{D0}=0,05$  kg de agua/kg. En la corriente de disolvente inicial, como es agua,  $y_{S0}=0$  kg de azúcar/kg y  $y_{D0}=1$  kg de agua/kg. Estas serán las coordenadas de la recta que une  $E_0$  con  $R_0$ :

Eje X	Eje Y
0	1
0,6	0,05

**2º Dibujar la curva de retención (CR) en el diagrama** triangular-rectangular (Figura 1). En este caso, al ser constante la relación disolución/inerte ( $\frac{x_D+x_S}{x_I}=2,5$ ), la CR será una recta paralela a la hipotenusa. Para averiguar los puntos de corte con el eje X ( $x_D=0$ ) y con el eje Y ( $x_S=0$ ), resolveremos los sistemas de ecuaciones en cada caso, asumiendo que  $x_S+x_D+x_I=1$ . Así, obtendremos las siguientes coordenadas para dos puntos de la recta que representa en este caso la curva de retención:

Eje X	Eje Y
0,714	0
0	0,714



**3º Cálculo de la cantidad de disolvente mínima ( $E_{0\text{mín}}$ ).** Este valor se puede calcular atendiendo al límite de solubilidad del soluto en el disolvente y también atendiendo a la capacidad de retención de fase líquida por parte del refinado. No olvidemos que la cantidad de disolvente mínima debe asegurar que todo el soluto se disuelve en la fase líquida o disolvente y además que esta no queda retenida en su totalidad por la fase sólida o refinado. Vamos a ver cómo se calcularía en cada caso. El valor más alto obtenido será el que condicione la cantidad de disolvente mínimo.

Atendiendo a la capacidad de retención de fase líquida por parte de la fase sólida o refinado. Debemos tener presente que, si la cantidad de disolvente es inferior a la capacidad de retención del sólido, al mezclar las dos corrientes toda la fase líquida quedará retenida por la fase sólida, siendo imposible separar dos fases tras el proceso de mezcla. En ese caso el punto que representa la corriente mezcla en el diagrama triangular ( $M_{\text{mín}}$ ) coincidirá con el punto que representa la corriente sólida resultante del proceso de separación ( $R_1$ ), que además estará sobre la curva de retención.

- a) **Ubicar en el diagrama** triangular-rectangular la corriente ficticia de mezcla mínima ( $M_{\text{mín}}$ ) atendiendo al criterio de la máxima capacidad de retención de fase líquida del refinado (Figura 1), donde la recta que une  $E_0$  y  $R_0$  intersecciona con la curva de retención de fase líquida por parte del refinado. En este caso, ese punto de corte establece las fracciones másicas de soluto y de disolvente de la corriente mezcla ( $M_{\text{mín}}$ ) que serán:

$$z_{S\text{mín}}=0,48 \text{ kg azúcar/kg totales y } z_{D\text{mín}}=0,23 \text{ kg agua/kg totales}$$

En este caso, el caudal de la corriente líquida o de extracto que podríamos separar tras la mezcla sería nula ( $E_1=0$ ) y el caudal de refinado coincidiría con la corriente mezcla ( $R_1=M_1$ ).

- b) **Cálculo por balances del caudal  $E_{0\text{mín}}$ .**

$$\text{BMT: } E_{0\text{mín}}+R_0=M_{\text{mín}}$$

$$\text{BS: } R_0X_{S0}=M_{\text{mín}}Z_{S\text{mín}}$$

Del BS sacaremos  $M_{\text{mín}}=105,05 \text{ kg/h}$  y, a continuación, del BMT calcularemos  $E_{0\text{mín}}=20,5 \text{ kg/h}$

Atendiendo al límite de solubilidad del soluto en la fase líquida o disolvente. Debemos tener en cuenta que la cantidad de disolvente mínima debe asegurar que todo el soluto que está presente en el sólido pueda disolverse en el disolvente o fase líquida con la que se mezcla. En estas condiciones el extracto o fase líquida que se separa tras la mezcla de las dos corrientes iniciales se obtendrá saturado de soluto.

- c) **Ubicar en el diagrama** triangular-rectangular la corriente ficticia de mezcla de saturación ( $M_{\text{sat}}$ ) atendiendo al criterio del límite de solubilidad del soluto en el extracto (Figura 1). Para ello, ubicaremos la corriente de extracto saturada ( $E_{\text{sat}}$ ) sabiendo que el límite de solubilidad del azúcar en agua es de un 60%, lo que se corresponde con una fracción másica  $y_{S\text{sat}}=0,6$ , y una fracción másica de disolvente  $y_{D\text{sat}}=0,4$ . Uniendo  $E_{\text{sat}}$  con el punto (0,0) del diagrama, donde corte a la recta que une  $E_0$  con  $R_0$ , tendremos la corriente ficticia mezcla de saturación ( $M_{\text{sat}}$ ) y leyendo los valores de su composición en el diagrama, obtendríamos que  $z_{S\text{sat}}=0,445 \text{ kg azúcar/kg totales y } z_{D\text{mín}}=0,295 \text{ kg agua/kg totales}$ .

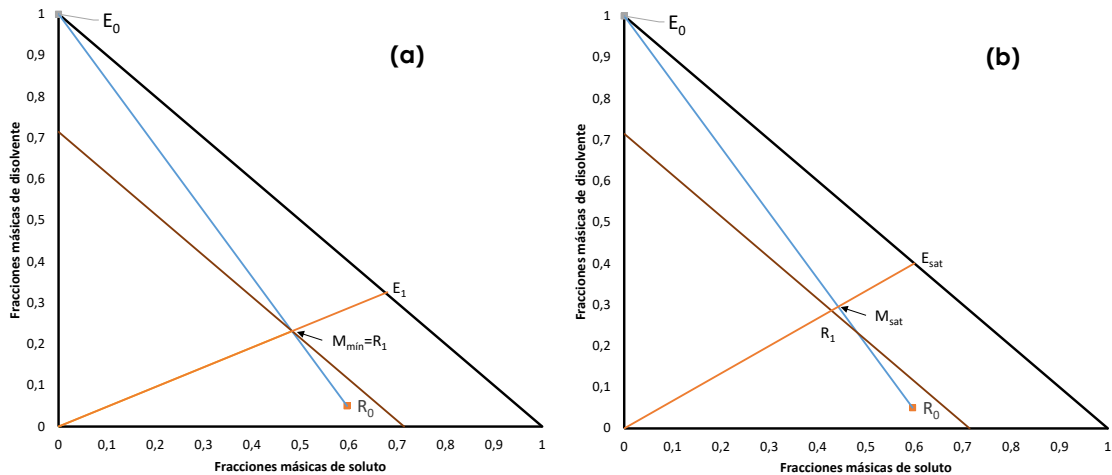
**d) Cálculo por balances del  $E_{0\min}$**

$$\text{BMT: } E_{0\min} + R_0 = M_{\text{sat}}$$

$$\text{BS: } R_0 X_{S0} = M_{\text{sat}} Z_{S\text{sat}}$$

Del BS sacaremos  $M_{\text{sat}} = 113,3 \text{ kg/h}$  y, a continuación, del BMT calcularemos  $E_{0\min} = 28,8 \text{ kg/h}$

Como la cantidad obtenida es mayor con el criterio del límite de solubilidad, ese será el valor que defina las necesidades de disolvente mínimo.



**Figura 1.** Ubicación en el diagrama triangular-rectangular de las corrientes de disolvente ( $E_0$ ), fase sólida ( $R_0$ ), extracto ( $E_1$ ), refinado ( $R_1$ ) y extracto saturado ( $E_{\text{sat}}$ ) en la etapa de extracción sólido-líquido. La recta naranja representa la curva de retención. Ubicación de las corrientes mezcla atendiendo al criterio de la capacidad de retención de fase líquida del refinado ( $M_{\min}$ ) **(a)** o del límite de solubilidad del soluto en el extracto ( $M_{\text{sat}}$ ) **(b)**.

**4º Cálculo de la cantidad de agua necesario.** Dado que la cantidad de disolvente ha de ser 50% superior al mínimo,  $E_0$  en cada etapa será:

$$E_0 = 1,5 \cdot E_{0\min} = 1,5 \cdot 28,8 = 43,14 \text{ kg/h en cada etapa}$$

$$\text{Puesto que hay 2 etapas } E_{0T} = 2 \cdot E_0 = 86,3 \text{ kg/h}$$

**5º Cálculo de los caudales y composiciones de las corrientes de salida de las dos etapas de extracción sólido-líquido con disolvente nuevo en cada etapa (Figura 2).**

5.1. Por balances, ubicaremos la corriente  $M_1$  sobre la recta que une  $E_0$  y  $R_0$

$$\text{BMT: } E_0 + R_0 = M_1 \rightarrow M_1 = 127,7 \text{ kg/h}$$

$$\text{BS: } R_0 X_{S0} = M_1 Z_{S1} \rightarrow z_{S1} = 0,395$$

$$\text{BD: } E_0 Y_{D0} + R_0 X_{D0} = M_1 Z_{D1} \rightarrow z_{D1} = 0,371$$

5.2. Uniremos la corriente  $M_1$  con el punto (0,0) y prolongaremos la recta hasta llegar a la hipotenusa. Donde corte a la curva de retención, ubicaremos  $R_1$  y donde corte a la hipotenusa, tendremos  $E_1$ . Leeremos su correspondiente composición, siendo los valores obtenidos:  $x_{S1} = 0,369$ ,  $y_{S1} = 0,52$ ,  $x_{D1} = 0,345$ ,  $y_{D1} = 0,48$ . De nuevo, aplicando balances, podremos sacar  $E_1$  y  $R_1$ :

$$\text{BMT: } M_1 = E_1 + R_1 \rightarrow E_1 = M_1 - R_1$$

$$BS: M_1 z_{s1} = E_1 y_{s1} + R_1 x_{s1} \rightarrow M_1 z_{s1} = (M_1 - R_1) y_{s1} + R_1 x_{s1} \rightarrow M_1 (z_{s1} - y_{s1}) = R_1 (x_{s1} - y_{s1})$$

$$R_1 = \frac{M_1 (z_{s1} - y_{s1})}{(x_{s1} - y_{s1})}$$

$$R_1 = 105,8 \text{ kg/h}$$

$$E_1 = 21,9 \text{ kg/h}$$

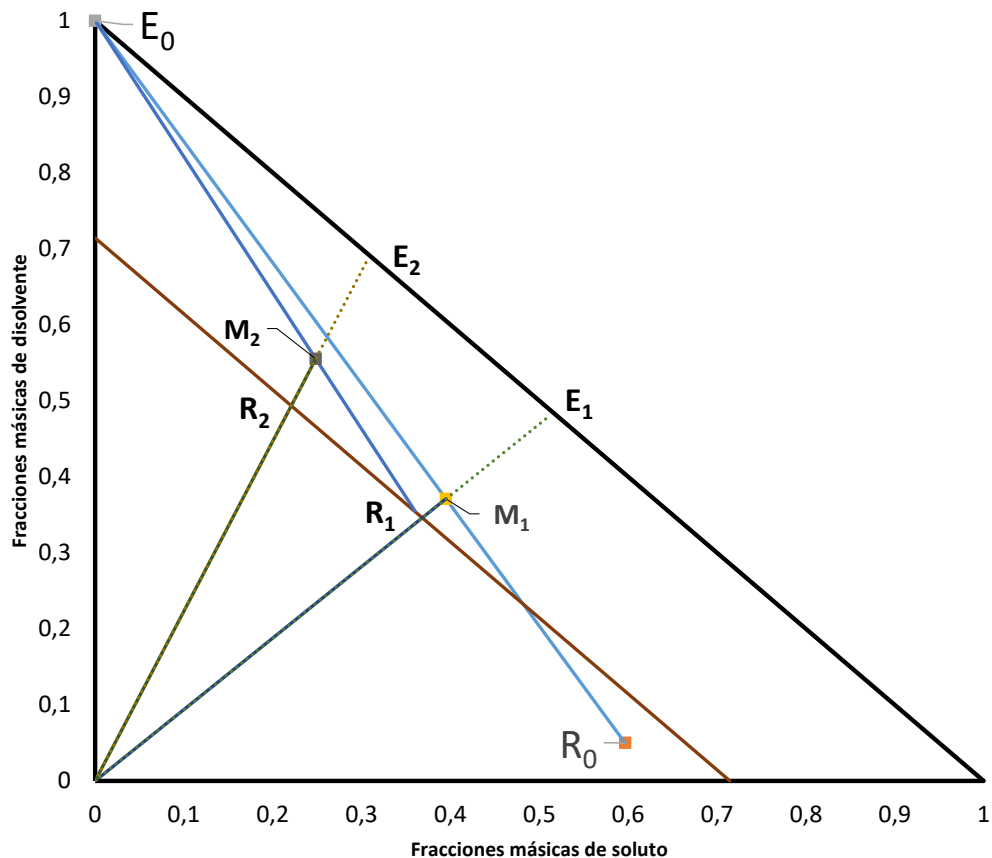
5.3. Uniremos la corriente  $R_1$  con  $E_0$ . Después calcularemos  $M_2$  del mismo modo como en el 5.1. y sacaremos  $R_2$ ,  $E_2$  y sus respectivas composiciones como en el punto 5.2, obteniendo los siguientes valores:

$M_2 = 148,95 \text{ kg/h}$	$z_{s2} = 0,26$	$z_{D2} = 0,53$
$R_2 = 99,4 \text{ kg/h}$	$x_{s2} = 0,233$	$x_{D2} = 0,481$
$E_2 = 49,6 \text{ kg/h}$	$y_{s2} = 0,326$	$y_{D2} = 0,6735$

#### 6º Cálculo del rendimiento de la operación de extracción sólido-líquido. I

Para ello, usaremos la siguiente ecuación:

$$\text{Rendimiento} = 100 \frac{R_0 x_{s0} - R_2 x_{s2}}{R_0 x_{s0}} = 54,7 \%$$



**Figura 2.** Ubicación en el diagrama triangular-rectangular de las corrientes involucradas en el proceso de extracción sólido-líquido del ejemplo de obtención de azúcar de remolacha.



## 5 Cierre

A lo largo de este objeto de aprendizaje hemos visto cómo calcular el disolvente mínimo en una etapa de extracción sólido-líquido, considerando dos situaciones: que exista un límite de solubilidad del soluto en el disolvente y teniendo en cuenta la capacidad de retener fase líquida por parte del refinado. Este valor, nos permitirá optimizar estos procesos, evitando utilizar disolvente en exceso.

## 6 Bibliografía

**Castelló, ML.; Fito, P.J.; Seguí, L.; Betoret, N.** (2020). Fundamentos de la Extracción Sólido-Líquido. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10251/147097>

**Castelló, ML.; Gil, L.; Fito, P.J.; Betoret, N.** (2020). Resolución de casos prácticos de extracción sólido-líquido con disolvente nuevo mediante el diagrama triangular. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10251/147098>

**Castelló, ML.; Seguí, L.; Betoret, N.; Fito, P.J.** (2020). Resolución de operaciones de extracción sólido-líquido por contacto múltiple y circulación en contracorriente. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10251/147096>