

## NTP 430: Gases licuados: evaporación de fugas y derrames



Liquefied gases: Evaporation of releases and spillages  
Gaz líquefiés: Evaporation de fuites et écoulements

Las NTP son guías de buenas prácticas. Sus indicaciones no son obligatorias salvo que estén recogidas en una disposición normativa vigente. A efectos de valorar la pertinencia de las recomendaciones contenidas en una NTP concreta es conveniente tener en cuenta su fecha de edición.

### Redactor:

Emilio Turmo Sierra  
Ingeniero Industrial

CENTRO NACIONAL DE CONDICIONES DE TRABAJO

*Esta Nota Técnica de Prevención forma parte del conjunto perteneciente al Análisis de Consecuencias del Riesgo Químico. Está dedicada a la evaporación de fugas y derrames accidentales de gases licuados, que por sus características de peligrosidad (inflamabilidad o toxicidad) requiere un estudio del proceso, para llegar a determinarla intensidad de evaporación, dato necesario para la fase posterior de dispersión de la nube que se forma.*

### Evaporación de gases licuados a presión

El estudio del fenómeno de la evaporación de un líquido o de un gas licuado, por fuga y derrame accidental, se puede realizar mediante modelos matemáticos para predecir la intensidad de evaporación en unas determinadas situaciones que conducen a la formación de una nube cuyos efectos dependerán de la magnitud de la evaporación. Dicho estudio del fenómeno requiere conocer el tipo de líquido derramado, las condiciones y tipo de emisión, el substrato y el área de confinamiento en que se derrama.

Esta situación se da cuando se produce una fuga y derrame por fallo del recipiente contenedor, accesorio, equipo o conducción de un gas licuado a presión. La temperatura inicial del líquido es la ambiental si el depósito está en equilibrio térmico con el medio ambiente. El gas licuado que escapa y se derrama normalmente está a una temperatura superior a su temperatura de ebullición a presión atmosférica, de ahí su nombre de líquido sobrecalentado.

Al producirse la pérdida de contención, el gas licuado sufre un descenso súbito de su presión de almacenamiento (la presión de vapor correspondiente a la temperatura de almacenamiento) hasta la presión atmosférica. Esto da lugar a una evaporación súbita, también llamada evaporación flash, que al mismo tiempo puede arrastrar una cantidad considerable de líquido en forma de aerosol (pequeñas gotas). Una parte de esas gotas puede volver a caer al suelo en forma de lluvia (rain out) debido al enfriamiento y condensación y otra parte se evaporará a causa de la absorción de calor procedente del aire ambiente que se mezcla con la emisión de fluido.

La parte de gas licuado restante forma un charco de líquido en el suelo que está a una temperatura igual a la de ebullición la cual es muy baja con respecto a la temperatura del suelo. Si el derrame es de poca magnitud, la evaporación del charco es muy rápida y todo el gas licuado se incorpora a la atmósfera en muy poco tiempo. En derrames importantes, tras la rápida evaporación inicial, el suelo (substrato) sufre un enfriamiento suficiente para que la subsiguiente evaporación del charco transcurra de forma menos rápida.

### Cálculo de la evaporación rápida inicial

Esta evaporación ocurre por una expansión rápida que se puede considerar adiabática, es decir sin transferencia de calor con su medio circundante. El calor necesario para la evaporación (calor latente de evaporación) es extraído del exceso de energía del propio líquido sobrecalentado que sufre un descenso de temperatura, desde la existente en el momento del derrame  $T_0$ , hasta la de ebullición a presión atmosférica  $T_{eb}$ .

La masa inicial evaporada se puede calcular del balance de energía, en que se iguala la cantidad de calor necesario para la evaporación con la cantidad de calor proporcionado por la masa de gas licuado, obteniendo la expresión

$$m_v = m_0 [1 - e^{-C_p (T_0 - T_{eb}) / h_v}]$$

en donde

$m_v$  = masa vaporizada en la evaporación rápida inicial (kg)

$m_0$  = masa inicial de gas licuado (kg)

$C_p$  = calor específico del gas licuado [J/(kg.K)]

$h_v$  = calor latente de vaporización del gas licuado [J/kg]

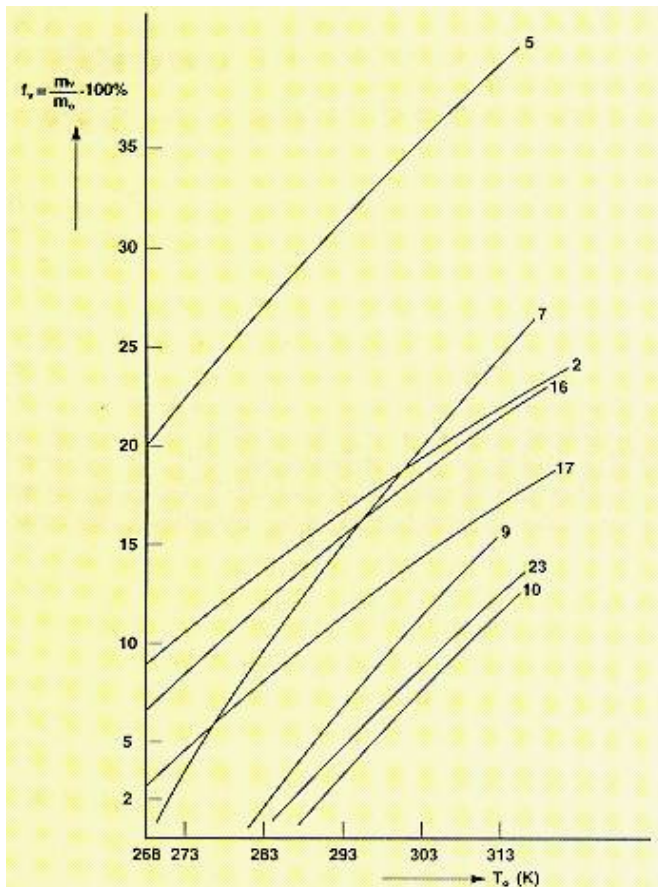
$T_0$  = temperatura inicial del gas licuado (K)

$T_{eb}$  = temperatura de ebullición del gas licuado (K)

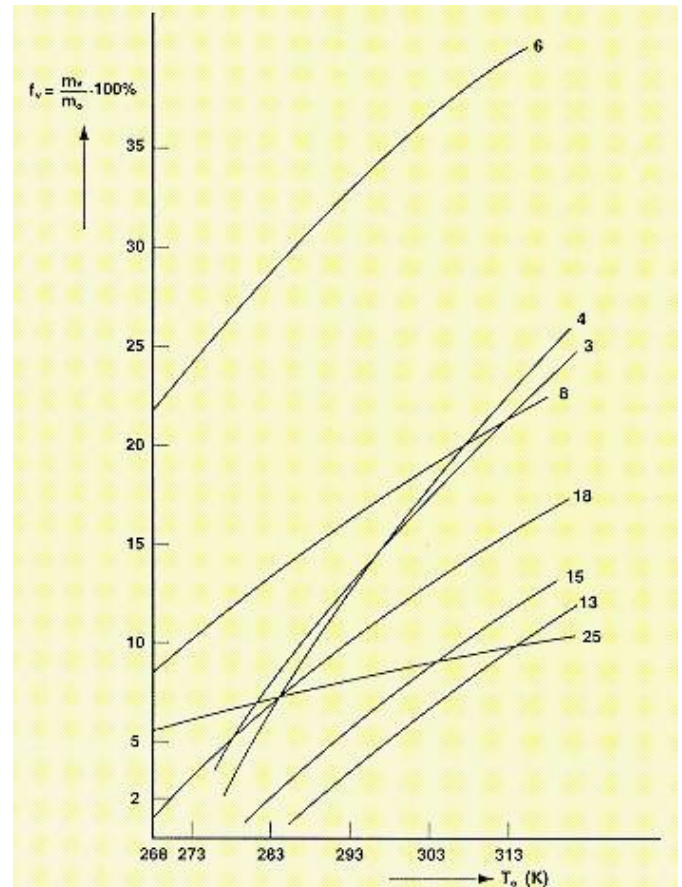
La expresión anterior es válida para la evaporación de un solo componente. En mezclas multicomponentes, el cálculo manual es complicado y se pueden utilizar programas informáticos para tales cálculos.

El valor de la fracción vaporizada  $f_v = m_v/m_0$  suele ser muy inferior a los valores observados experimentalmente, lo cual se debe principalmente al arrastre de líquido en forma de gotas pequeñas (aerosol). La formación de este aerosol aumenta la masa total de gas licuado que se incorpora a la nube y afecta a las características de ésta, aumentando su densidad aparente y causando un enfriamiento adicional (por evaporación de las gotas de aerosol que roban calor del aire entremezclado, y que puede conducir a la condensación de la humedad del aire atmosférico). La predicción fiable del grado de formación de aerosol es difícil, requiriendo modelos complicados del proceso. Kletz propone una estimación simplificada, sugiriendo que la fracción procedente del aerosol iguale a la evaporación inicial, con lo que un valor aproximado de la fracción líquida que pasa a formar la nube inicial se considera igual a  $2f_v$ . En la bibliografía especializada se citan trabajos experimentales en que no queda gas licuado remanente tras la evaporación inicial, a pesar de que la fracción teórica vaporizada era solamente el 20% (y en algunos casos el 10%). En ausencia de cálculos más sofisticados, el criterio más conservador sería admitir que toda la masa vertida se incorpora a la nube, excepto para los casos en que el cálculo de la fracción teórica vaporizada sea inferior al 10 -20%, en cuyo caso se podría aplicar la corrección sugerida por Kletz.

La figura 1 y la figura 2 muestran el valor de  $f_v$  en porcentaje para un grupo importante de gases licuados a distintas temperaturas de almacenamiento. La tabla 1, que se muestra más adelante, presenta valores de las temperaturas de ebullición  $T_{eb}$ , calores específicos  $c_p$  y calores latentes de vaporización  $h_v$  de los gases más comunes con los números de referencia para las dos figuras.



**Fig. 1: Fracción teórica (calculada) vaporizada inicialmente en la expansión adiabática de un gas licuado a presión (número de referencia en tabla 1)**



**Fig. 2: Fracción teórica (calculada) vaporizada inicialmente en la expansión adiabática de un gas licuado a presión (número de referencia en tabla 1)**

**Tabla 1: Propiedades de los gases licuados a presión más comunes**

Gas licuado	Temperatura de ebullición $T_{eb}$ (K)	Calor específico del líquido (a T Kelvin) $c_p$ [ $\times 10^3$ J/kg. K]	Calor latente de vaporización $h_v$ [ $\times 10^5$ J/kg] (a $T_{eb}$ )
1 - Acetaldehído	293	1,383 (300)	5,7
2 - Amoniaco	240	4,609 (270)	13,7
3 - Butadieno	269	2,347 (300)	4,2
4 - Butano	273	2,514 (300)	3,9
5 - Propano	231	2,640 (260)	4,3
6 - Propileno	226	2,560 (260)	4,4
7 - Butileno	267	2,410 (285)	3,9
8 - Cloro	239	0,950 (295)	2,9
9 - Dimetilamina	280	3,100 (295)	5,9
10 - Cloruro de etilo	285	1,760 (295)	3,8
11 - Etano	184	2,490 (203)	4,9
12 - Etileno	170	2,790 (194)	4,9
13 - Óxido de etileno	284	1,990 (295)	5,8
14 - Metano	112	3,770 (139)	5,1
15 - Bromuro de metilo	277	0,838 (295)	2,5
16 - Cloruro de metilo	249	1,580 (268)	4,2
17 - Cloruro de vinilo	259	1,300 (283)	3,7
18 - Dióxido de azufre	263	1,373 (283)	4,0
19 - Bromuro de hidrógeno	204	0,490 (293)	2,1
20 - Cloruro de hidrógeno	188	0,800 (293)	4,3
21 - Fluoruro de hidrógeno	293	3,017 (290)	3,4
22 - Formaldehído	253	3,352 (293)	7,8
23 - Fosgeno	281	1,048 (-)	2,5
24 - Monóxido de carbono	83	1,420 (115)	2,2
25 - Sulfuro de hidrógeno	213	0,545 (-)	5,4
26 - Acetileno	189	2,690 (233)	6,3

## Cálculo de la evaporación del gas licuado derramado sobre tierra

Esta situación se da en la evaporación de derrames de gases licuados por enfriamiento (refrigerados) que están a su temperatura de ebullición o próximos a ella y en la evaporación de derrames procedentes de gases licuados a presión después de haber ocurrido la evaporación rápida inicial y quedar un charco de gas licuado a su temperatura de ebullición.

Un aspecto importante para el cálculo de la evaporación es el tipo de substrato sobre el que se extiende el charco de gas licuado.

### Evaporación de gases licuados en suelo no permeable

Cuando un gas licuado a su relativamente baja temperatura de ebullición entra en contacto con un terreno seco a mayor temperatura y que por ser impermeable no penetra en él de una manera significativa, se establece una transferencia de calor del medio a mayor temperatura (suelo) al de menor (masa de gas licuado).

La solución matemática a este fenómeno físico da el flujo de calor  $q_s$  ( $W/m^2$ ) transferido por conducción desde el terreno a la masa de gas licuado del charco

$$q_s = \lambda_s (T_s - T_{eb}) / (\pi a_s)^{1/2} t^{1/2} \text{ (W/m}^2\text{)}$$

en donde

$\lambda_s$  = Conductividad térmica del substrato [ $W/(m \cdot K)$ ]

$T_s$  = temperatura del substrato (K)

$T_{eb}$  = Temperatura de ebullición del gas licuado (K)



$a_s$  = coeficiente de difusividad del substrato ( $m^2/s$ )

$t$  = tiempo transcurrido (s)

El flujo de evaporación  $m_e$  del gas licuado extendido formando un charco sobre un suelo no permeable y en función del tiempo será:

$$m_e = q_s / h_v = \lambda_s (T_s - T_{eb}) / [h_v (\pi a_s)^{1/2}] t^{-1/2} \text{ [kg/(m}^2 \cdot \text{s)]}$$

Si se hace la transformación

$$\lambda_s (T_s - T_{eb}) / [h_v (\pi a_s)^{1/2}] = e$$

siendo  $e$  un coeficiente independiente del tiempo en unidades  $[\text{kg/m}^2 \text{ s}^{1/2}]$  la expresión del flujo de evaporación en función del tiempo queda así:

$$m_e = e t^{1/2} \text{ [kg/m}^2 \cdot \text{s]}$$

Para la aplicación de la fórmula se necesitan los valores de las constantes de los gases licuados implicados y de los materiales del substrato que se indican en las tabla 1 y la tabla 2.

**Tabla 2: Constantes del material de algunos suelos**

Material	Conductividad térmica $\lambda_s$ [W/m.K]	Difusividad $a_s$ [ $m^2/s$ ]
Suelo promedio (8% agua)	0,9	$4,3 \times 10^{-7}$
Arena (seca)	0,3	$2,3 \times 10^{-7}$
Suelo arenoso (seco)	0,3	$2 \times 10^{-7}$
Suelo arenoso (8% agua)	0,6	$3,3 \times 10^{-7}$
Madera	0,2	$4,5 \times 10^{-7}$
Gravilla	2,5	$11 \times 10^{-7}$
Cemento (valor medio)	1,1	$10 \times 10^{-7}$
Acero al carbono	45	$127 \times 10^{-7}$

Si el charco de gas licuado formado requiere un tiempo largo para su completa evaporación, el terreno ya no podrá aportar energía calorífica y a partir de un cierto momento debe tenerse en cuenta la influencia de la radiación solar y la evaporación ocasionada por la convección del aire circundante.

En cuanto a la radiación solar varía notablemente según la hora del día, la época del año, las condiciones ambientales y la latitud geográfica del lugar. Un valor promedio de la radiación solar es  $q_{rs} = 400 \text{ W/m}^2$  y en bibliografía especializada del tema se citan valores típicos de radiación solar máxima (a mediodía en días claros), oscilando entre  $425 \text{ W/m}^2$  (enero) y  $1170 \text{ W/m}^2$  (julio) para una latitud de  $45^\circ$  norte. Para una latitud de  $35^\circ$  norte los valores correspondientes serían  $650 \text{ W/m}^2$  y  $1140 \text{ W/m}^2$ , respectivamente.

En un derrame que ocurra sobre una superficie aislada térmicamente, el efecto de la radiación solar o de la convección del aire circundante puede ser dominante al cabo de un período de tiempo corto.

Se recomienda comparar el valor calculado anteriormente con el que daría el flujo de evaporación de un líquido con temperatura de ebullición superior a la temperatura ambiente mediante la fórmula de Sutton y elegir el valor mayor de los dos. En general esta fórmula se emplea para líquidos cuya presión parcial de vapor es igual o menor que  $2 \times 10^4 \text{ Pa}$ . Esta fórmula tiene la siguiente expresión para una condición de estabilidad atmosférica neutra (ver NTP 329-1993).

$$m_e = 2 \times 10^{-3} \cdot u_{10}^{0,78} \cdot r^{-0,11} \cdot M_m P_t / (RT) \cdot \ln [1 + (P_{vs} - P_{v \text{ air}}) / (P_t - P_{vs})]$$

superficie circular

$$m_e = 2 \times 10^{-3} \cdot u_{10}^{0,78} \cdot L^{-0,11} \cdot M_m P_t / (RT) \cdot \ln [1 + (P_{vs} - P_{v \text{ air}}) / (P_t - P_{vs})]$$

superficie cuadrada

$m_e$  = flujo o tasa de evaporación [ $\text{kg} / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]

$u_{10}$  = velocidad del viento a 10 m de altura (m/s)

$r$  = radio del charco circular (m)

$L$  = longitud del lado del charco cuadrado (m)

$M_m$  = peso o masa molecular (-)

$P_t$  = presión total (Pa)

$P_{vs}$  = presión de vapor del compuesto que se evapora, sobre la superficie del líquido (Pa)

$P_{v\ air}$  = presión de vapor del compuesto que se evapora, en los alrededores (Pa)

$R$  = constante de los gases [(8310 J / (kmol · K))]

$T$  = temperatura absoluta de la superficie del líquido. (K)

### Evaporación de gases licuados refrigerados en suelo permeable y seco

Las expresiones utilizadas para esta situación se basan en los ensayos experimentales realizados con un gas licuado refrigerado, en particular el gas natural licuado, evaporados en suelo arenoso y seco.

El flujo de evaporación producido por conducción térmica desde el suelo se ajusta a la ecuación

$$m_e = 0,95 t^{-1/2} \text{ [kg / (m}^2 \cdot \text{s)]}$$

Si se utiliza la fórmula de evaporación de un gas licuado en suelo no permeable

$m_e = e t^{-1/2}$  en donde  $e = \lambda_s \cdot (T_s - T_{eb}) / [h_v (\pi a_s)^{1/2}]$  y se sustituyen los parámetros correspondientes al gas natural y a un suelo arenoso seco a 20°C se obtiene

$$e = 0,3 (293-112) / [5,1 \times 10^5 (\pi \cdot 2,3 \times 10^{-7})^{1/2}] = 0,125$$

siendo

$$\lambda_s = 0,3 \text{ W / (m} \cdot \text{K)} \text{ (Tabla 2)}$$

$$T_s = 293 \text{ K}$$

$$T_{eb} = 112 \text{ K (Tabla 1)}$$

$$h_v = 5,1 \times 10^5 \text{ J / kg (Tabla 1)}$$

$$a_s = 2,3 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s (Tabla 2)}$$

El flujo de evaporación teórico para suelo no permeable sería

$$m_e = 0,125 t^{-1/2}$$

Estableciendo la razón entre el valor experimental y el correspondiente a suelo no permeable se tiene

$$0,95 t^{-1/2} / 0,125 t^{-1/2} = 7,6 \approx 8$$

Esto indica que el flujo de evaporación calculado teóricamente es unas ocho veces menor que el determinado experimentalmente. La explicación a esta diferencia puede hacerse por la influencia de la penetración del líquido en el suelo. Según los datos experimentales observados, la fórmula empírica también se puede aplicar al propano y butano derramado sobre suelo arenoso y seco.

De todo lo razonado, para el flujo de evaporación de un gas licuado, derramado sobre un suelo permeable y seco y en función del tiempo, se puede aplicar la expresión siguiente

$$m_e = e t^{-1/2} \text{ [kg / m}^2 \cdot \text{s)] siendo } e = 8\lambda_s (T_s - T_{eb}) / [h_v (\pi a_s)^{1/2}]$$

con lo que desarrollada es

$$m_e = 8\lambda_s (T_s - T_{eb}) / [h_v (\pi a_s)^{1/2}] t^{1/2} \text{ [kg / (m}^2 \cdot \text{s)]}$$

Igualmente se debe remarcar que para tiempos largos, se recomienda hacer el cálculo de la evaporación ocasionada por convección para líquidos (fórmula de Sutton) y adoptar el valor mayor obtenido.

## Aplicación práctica

Calcular el flujo de evaporación en función del tiempo, de un derrame instantáneo ocasionado por la rotura de un recipiente soportado por pilares y que contiene 6000 kg de cloro licuado a 20°C sobre un cubeto circular de 5 m de diámetro cuyo suelo es de cemento.

Solución: La evaporación se debe separar entre la evaporación rápida inicial (flash) y la evaporación del charco que se extiende en las inmediaciones del recipiente contenedor y en este caso en la superficie del cubeto de retención.

### Cálculo de la evaporación rápida inicial

Datos fisicoquímicos del cloro:

Calor específico  $c_p = 950 \text{ J / (kg} \cdot \text{K)}$  a 295 K (22°C) (Tabla 1)

Calor latente de vaporización  $h_v = 2,9 \times 10^5 \text{ J / kg}$  (Tabla 1)

Masa inicial de cloro licuado  $m_0 = 6000 \text{ kg}$

Temperatura de ebullición  $T_{eb} = 239 \text{ K}$  (-34,6°C) (Tabla 1)

Temperatura de almacenamiento  $T_0 = 293 \text{ K}$  (20°C)

La evaporación rápida inicial se calcula con la expresión

$$\begin{aligned} m_v &= m_0 \{1 - \exp[-c_p (T_{eb} - T_0) / h_v]\} = \\ &= 6000 \{1 - e^{950 (239-293) / (2,9 \times 100000)}\} = \\ &= 6000 \{[1 - e^{-0,1768965}]\} = 972,8 \text{ kg} \end{aligned}$$

Esta masa es el dato inicial de la siguiente fase a considerar, esto es la dispersión de una emisión instantánea, que será tratada en otra NTP.

La fracción evaporada inicialmente es  $f_v = m_v / m_0 = 972,8 / 6000 = 0,162 = 16,2\%$ .

Considerando la recomendación de T. Kletz se debería adoptar como valor más real de la masa de la nube formada, el doble de la masa teórica calculada, es decir  $2 \times 972,8 = 1945,6 \text{ kg}$

La cantidad no evaporada inicialmente que llamaremos masa final  $m_f$ , será por tanto:

$m_f = 6000 - 972,8 = 5027,2 \text{ kg}$  en cálculo teórico y  $m_f = 6000 - 1945,6 = 4054,4 \text{ kg}$  en el más real.

### Cálculo de la evaporación del charco formado en función del tiempo

La cantidad no evaporada inicialmente cae al suelo y se extiende en la superficie del cubeto.

El flujo de evaporación por unidad de superficie y en función del tiempo será:

$$m_e = \lambda_s (T_s - T_{eb}) / [h_v (\pi a_s)^{1/2}] t^{1/2} \text{ [kg / (m}^2 \cdot \text{s)]}$$

Datos:

Conductividad del suelo de cemento  $\lambda_s = 1,1 \text{ W / (m} \cdot \text{K)}$  (Tabla 2)

Difusividad del suelo de cemento  $a_s = 10 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  (Tabla 2)

Temperatura del suelo  $T_s = 273 + 20 = 293 \text{ K}$

Temperatura de ebullición del cloro licuado  $T_{eb} = 273 - 34 = 239 \text{ K}$  (Tabla 1)

Calor latente de vaporización del cloro licuado  $h_v = 2,9 \times 10^5 \text{ J/kg}$  (Tabla 1)

Tiempo desde inicio del derrame  $t$  en segundos

$$m_e = 1,1 (293 - 239) / [2,9 \times 10^5 (\pi \cdot 10 \times 10^{-7})^{1/2}] t^{1/2} = 0,1155615 t^{1/2} \text{ [kg/(m}^2 \cdot \text{s)]}$$

Considerando la superficie total de evaporación del cubeto  $A = \pi r^2 = \pi 2,5^2 = 19,63 \text{ m}^2$  se tiene

$$m_e \cdot A = 0,1155615 \times 19,63 t^{1/2} = 2,27 t^{1/2} \text{ kg/s}$$

Esta ecuación nos daría los valores de la velocidad o tasa de evaporación para distintos tiempos.

Se puede determinar el tiempo a partir del cual empieza a ser significativo el calor recibido por radiación del sol, que varía entre  $425 \text{ W/m}^2$  en enero y  $1170 \text{ W/m}^2$  en julio, para una latitud de  $45^\circ$  norte y a mediodía en días claros. Para ello se toma la expresión que da el flujo calorífico procedente del terreno en función del tiempo

$$q_s = \lambda_s (T_s - T_{eb}) / (\pi a_s)^{1/2} t^{1/2} \text{ (W / m}^2\text{)}$$

$$q_s = 1,1 (293 - 239) / (\pi \cdot 10 \times 10^{-7})^{1/2} t^{1/2} = 33512,86 t^{1/2} \text{ (W / m}^2\text{)}$$

Se puede considerar significativo el efecto de la radiación solar cuando sea como mínimo el 10 % del flujo calorífico recibido del suelo. En enero se tendría  $425 = 10\% \cdot 4250 \text{ W/m}^2$  para lo cual tendrían que transcurrir

$$4250 \text{ W / m}^2 = 33512 t^{1/2} \Rightarrow t = (33512,86 / 4250)^2 = 62,18 \text{ s}$$

En julio a la hora de mayor radiación se tendría el 10% cuando el flujo calorífico del suelo fuera  $11700 \text{ W/m}^2$  lo cual ocurriría al cabo de

$$11700 \text{ W / m}^2 = 33512,86 t^{1/2} \Rightarrow t = (33512,86 / 11700)^2 = 8,20 \text{ s}$$

Ahora se puede comparar con el resultado que proporcionaría la ecuación de Sutton aplicada en la evaporación de líquidos por convección, suponiendo que no fuera un gas licuado, en la superficie circular del cubeto, con una velocidad del viento de  $2 \text{ m/s}$  y considerando el límite máximo de presión parcial de vapor  $2 \times 10^4 \text{ Pa}$  y  $P_{\text{vair}} = 0$  para la aplicación de la fórmula

$$m_e = 2 \times 10^{-3} \cdot 2^{0,78} \cdot 2,5^{-0,11} \cdot 71 \cdot 10^5 / (8310 \cdot 239) \ln [1 + (2 \times 10^4 - 0) / (10^5 - 2 \times 10^4)] = 0,0024768 \text{ kg / (m}^2 \cdot \text{s)}$$

Para la superficie total del cubeto  $A = 19,63 \text{ m}^2$  sería

$$m_e \cdot A = 0,0024768 \times 19,63 = 0,048621 \text{ kg/s}$$

Comparando con la tasa de evaporación calculada anteriormente se observa que el efecto de la transferencia de calor por convección en un líquido con una presión parcial de vapor de  $2 \times 10^4 \text{ Pa}$  tardaría unos  $2400 \text{ s}$  (40 min) en dar la tasa de evaporación del gas licuado considerado (cloro).

Los cálculos realizados teniendo en cuenta sólo la absorción de calor del suelo dan un tiempo de permanencia del gas licuado derramado superior al real ya que según se ha visto, el efecto de la radiación solar en verano empieza a los pocos segundos y en invierno al cabo de un minuto aproximadamente y se ha despreciado la evaporación por calor de convección, por lo que en cálculos más precisos se debería considerar el efecto combinado de las tres fuentes de calor. Por ejemplo, el flujo de evaporación  $m_{rs}$  debido a la radiación solar en el mes de julio es igual a

$$m_{rs} = 1170 \text{ (W / m}^2\text{)} / (2,9 \times 10^5 \text{ J/kg)} =$$

$$= 0,0040344 \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)} = 4,03 \times 10^{-3} \text{ kg / (m}^2 \cdot \text{s)}$$

En los  $19,63 \text{ m}^2$  del cubeto sería  $m_{rs} \cdot 19,63 = 0,0791952 \text{ kg/s} \approx 0,08 \text{ kg/s}$  que podría ser añadido y dar un flujo total de evaporación en función del tiempo.

Si se desea conocer la masa total  $M_e(t)$  evaporada al cabo de un tiempo  $t$ , se calcularía

$$M_e(t) = \int m_e(t) dt = 2,27 \int t^{-1/2} dt = 4,54 t^{1/2}$$

Teniendo en cuenta la influencia de la radiación solar se incluiría el flujo constante  $m_{rs} = 0,08$  kg/s multiplicado por el tiempo transcurrido, con lo cual se tendría:

$$M_e(t) = 4,54 t^{1/2} + 0,08 t$$

Se puede completar la tabla 3 con los valores anteriores y la masa total evaporada en función del tiempo.

**Tabla 3: Flujos de evaporación y masa total evaporada en función del tiempo en el cubeto de retención del derrame de cloro**

Tiempo (s)	Flujo evaporación (suelo) (kg/s)	Flujo total evaporación (suelo+radiación solar) (kg/s)	Masa total evaporada (suelo+radiación solar) (kg)
1	2,27	2,35	4,62
10	0,72	0,80	15,16
30	0,41	0,49	27,27
60	0,29	0,37	39,97
300	0,13	0,21	102,64
600	0,09	0,17	159,21
1 200	0,07	0,15	253,27
1 800	0,05	0,13	336,62
2 400	0,04	0,126	414,41

## Bibliografía

(1) SANTAMARÍA, J.M. y BRAÑA, P.A.

**Análisis y reducción de riesgos en la industria química.**

Madrid, Editorial MAPFRE, 1994.

(2) TNO.

**Methods for the calculation of physical effects resulting from releases of hazardous materials (liquids and gases).** 2nd ed.

Voorburg, The Netherlands, TNO, 1992.