



Universidad
Zaragoza



Tecnología CCS: Influencia de las impurezas CH_4 y SO_2 en el transporte del CO_2 antropogénico

Autora: Alba Gros Royes

Director: Javier Fernández López

Departamento de Química Física

Facultad de Ciencias

Universidad de Zaragoza

RESUMEN

La captura, transporte y almacenamiento del CO_2 antropogénico (CCS) es una buena estrategia para reducir los niveles de gases de efecto invernadero. El tipo y cantidad de impurezas influyen en las propiedades y el comportamiento del fluido, por lo que deben ser consideradas en el diseño, construcción y operación de las instalaciones de esta tecnología, así como para desarrollar modelos teóricos para aplicaciones específicas de ingeniería. La presencia de alguna impureza, como SO_2 , puede favorecer algunos aspectos de esta tecnología.

En este trabajo, se ha medido experimentalmente la densidad en función de la presión y temperatura y el equilibrio líquido-vapor para una mezcla ternaria $\text{CO}_2+\text{CH}_4+\text{SO}_2$ con una composición en fracción molar de 0,9344, 0,0185 y 0,0472, respectivamente, a las temperaturas de 263,15 K, 273,15 K, 293,15 K y 304,21 K y a presiones hasta 20 MPa, que son condiciones de interés para la tecnología CCS y para una posible co-captura $\text{CO}_2\text{-SO}_2$.

Se han calculado varios parámetros de transporte: presión operacional mínima, caída de presión y densidad en la tubería y diámetro de la misma, y se han extraído conclusiones sobre el impacto de las impurezas SO_2 y CH_4 en el transporte del CO_2 antropogénico.

Se han comparado los resultados con los correspondientes al CO_2 puro y a las mezclas binarias CO_2+SO_2 y CO_2+CH_4 , concluyendo que la presencia de SO_2 favorece todos los aspectos estudiados para el transporte, mientras que la presencia del CH_4 los perjudica. Ambos efectos se compensan parcialmente de forma que la mezcla ternaria estudiada presenta condiciones ligeramente más favorables que el CO_2 puro, lo que habla a favor de la co-captura $\text{CO}_2\text{-SO}_2$ incluso con la presencia de CH_4 .

ABSTRACT

Capture, transport and storage of anthropogenic carbon dioxide (CSS) is a good strategy to reduce the greenhouse gases. The type and quantity of impurities affect the fluid properties and behaviour, and should therefore be considered in the design, construction and operation of these technology facilities and, at the same time, in the development of theoretical models for engineering specific applications. The presence of some impurities as SO_2 may favour some aspects of this technology.

In this work, we experimentally measured the density and the vapour-liquid equilibrium for a ternary mixture $\text{CO}_2+\text{CH}_4+\text{SO}_2$ with a composition in mole fraction of 0,9344, 0,0185 y 0,0472, respectively, at temperatures of 263,15 K, 273,15 K, 293,15 K y 304,21 K and up to the pressures of 20 MPa, which are interest conditions of the CCS technology and for a possible CO_2 - SO_2 cocapture.

Different parameters of transport have been calculated, as the minimum operational pressure, the pressure and density drops along the pipeline and diameter of the pipeline, and conclusions about the impact of the impurities SO_2 and CH_4 in the transport of anthropogenic CO_2 have been drawn.

The results have been compared with those found in the literature for pure CO_2 and for the binary mixtures CO_2 - SO_2 and CO_2 - CH_4 , concluding that the presence of SO_2 favoured all the different studied aspects for transport, while the presence of CH_4 prejudice them. Both effects partially cancel and the ternary mixture presents conditions slightly more favourable than the pure CO_2 , which talks in favour of the CO_2 - SO_2 cocapture even in presence of CH_4 .

ÍNDICE

1. Introducción.....	1
2. Objetivos y planteamiento.....	2
3. Parte experimental.....	3
3.1. Materiales.....	3
3.2. Instrumentación y procedimiento.....	3
3.3. Calibración.....	6
3.4. Medida de las densidades.....	7
3.5. Determinación de las propiedades del ELV.....	7
3.6. Medidas de seguridad.....	7
4. Resultados.....	8
5. Discusión.....	9
5.1. Resultados de densidades y ELV.....	9
5.2. Efecto de las impurezas en el transporte (CCS)	10
5.2.1. Presión operacional mínima.....	10
5.2.2. Caídas de presión y densidad a lo largo de la tubería.....	11
5.2.3. Diámetros de tubería.....	13
6. Conclusión.....	16
7. Bibliografía.....	17
Anexos.....	18

1. INTRODUCCIÓN

La tecnología de captura, transporte y almacenamiento del CO₂ antropogénico o CCS (Carbon Capture and Storage) es una de las estrategias más eficaces para la reducción del cambio climático a medio plazo, junto con otras como el uso de energías renovables y la eficiencia energética. Este trabajo se va a centrar en el estudio del CO₂ antropogénico, que es el CO₂ producido por la actividad humana. Es un gas de efecto invernadero cuya concentración en la atmósfera se ha visto incrementada hasta un 30% en apenas 50 años, debido fundamentalmente a la quema de combustibles fósiles y a la deforestación, siendo sobre todo China y EEUU los grandes productores de CO₂.¹

El objetivo del CCS es evitar o al menos disminuir en la mayor cantidad posible la liberación a la atmósfera de CO₂ antropogénico generado por las industrias y las fuentes productoras de energía.

El año pasado, el Instituto global del CCS identificó 38 proyectos de CCS a gran escala en todo el mundo, de los cuales más de 20 estarán operativos a finales de este año.²

Según la Agencia Internacional de la Energía se necesita capturar y almacenar casi 4.000 millones de toneladas anuales de CO₂ hasta el año 2040, para evitar que la temperatura aumente por encima de 2°C sobre los niveles preindustriales.² Para 2050, la cantidad necesaria será de más de 8000 millones de toneladas anuales.

La tecnología CCS consta de cuatro etapas: captura, acondicionamiento, transporte e inyección y almacenamiento del CO₂.

El CO₂ se captura en las instalaciones que lo producen y posteriormente se acondiciona, se transporta y se inyecta en campos de almacenamiento geológico subterráneos. La captura del CO₂ puede lograrse mediante diferentes técnicas, como pueden ser postcombustión, precombustión u oxi-combustión. El acondicionamiento se puede llevar a cabo por deshidratación, separación de gases no condensables y/o licuefacción, y compresión/bombeo. El transporte se realiza normalmente por tubería y el CO₂ antropogénico es finalmente inyectado en pozos de petróleo o gas agotados, formaciones salinas profundas o pozos de carbón profundos no explotables. La alta purificación después de la captura es técnicamente posible pero no económicamente viable, por lo que el CO₂ antropogénico no es CO₂ puro, si no que contiene diversas impurezas procedentes tanto de su fuente de origen como de los procesos de captura y acondicionamiento. La presencia de impurezas en el fluido y los amplios rangos de temperatura y presión implicados en CCS causan diferencias significativas entre las propiedades fisicoquímicas del CO₂ antropogénico según su origen y los cambios que se producen a lo largo del proceso hasta que se almacena, e influyen claramente en el diseño y operación de las instalaciones CCS.³ La elaboración de las regulaciones correspondientes requiere el estudio de la influencia de las impurezas sobre las propiedades termodinámicas del fluido que se transporta.

Estudios recientes parecen indicar que algunas impurezas, como el SO₂, pueden favorecer algunas etapas de la tecnología CCS, por lo que se ha planteado la posibilidad de la captura, transporte y almacenamiento conjuntos del CO₂ y el SO₂ (co-captura CO₂-SO₂), lo que además evitaría la emisión de SO₂ a la atmósfera.⁴

Algunos proyectos de investigación actualmente se dedican a evaluar el impacto de la calidad del fluido en su comportamiento durante el transporte y almacenamiento, ya que existe una gran escasez de datos experimentales sobre las mezclas de interés específicas para esta tecnología.⁵

Debido a que algunas impurezas del CO_2 antropogénico son tóxicas y éste es directamente tóxico en el aire cuando las concentraciones inhaladas son mayores del 5%, la operación segura de las instalaciones de CO_2 es de gran importancia. Debido al alto coeficiente de expansión de Joule-Thomson y sus coordenadas del punto triple, la rápida expansión de una liberación accidental del CO_2 puede conducir a la formación de sólidos y provocar la rotura o perforación de las tuberías.⁵

Este trabajo proporciona nuevos datos experimentales sobre propiedades volumétricas y ELV de una mezcla $\text{CO}_2+\text{CH}_4+\text{SO}_2$, con las composiciones, presiones y temperaturas de interés para la tecnología CCS. Utilizando estos datos, se han obtenido conclusiones sobre el impacto de las impurezas CH_4 y SO_2 , en las propiedades del CO_2 antropogénico y en varios parámetros relacionados con su transporte por tubería en la tecnología CCS, evaluando así la posibilidad de co-captura $\text{CO}_2\text{-SO}_2$, incluyendo la impureza CH_4 . Los datos aportados podrán ser usados para validar modelos teóricos como ecuaciones de estado.

2. OBJETIVOS Y PLANTEAMIENTO

Objetivos académicos

El TFG debe ser una labor autónoma y personal del estudiante en el que se pongan de manifiesto los conocimientos, habilidades y aptitudes adquiridos a lo largo de su formación, y que esté relacionado con la Química.

Además, deberá ser acorde con las competencias adquiridas por el estudiante en el Grado en Química. Este trabajo se corresponde con un trabajo de carácter experimental en el laboratorio para la obtención e interpretación de resultados generados por el estudiante.

Objetivos científicos

Este trabajo es parte de un estudio que se está llevando a cabo en sistemas de CO_2 que contienen impurezas, con el objetivo de aportar datos experimentales del comportamiento termodinámico de las mezclas de CO_2 antropogénico en condiciones de interés para la tecnología CCS.

Estos datos permitirán evaluar la viabilidad de la co-captura del $\text{CO}_2\text{-SO}_2$ junto con otras impurezas.

Las mezclas que se utilizan son mezclas sintéticas multicomponentes con composiciones representativas de las emisiones de las principales fuentes en Europa y EEUU.^{6,7}

Por tanto, los objetivos científicos de este trabajo se pueden resumir:

- 1) Determinar experimentalmente datos termodinámicos de una mezcla $\text{CO}_2+\text{CH}_4+\text{SO}_2$ de interés en la tecnología CCS.
- 2) Comparar el comportamiento de la mezcla ternaria con el de las dos binarias CO_2+SO_2 y CO_2+CH_4 y con el CO_2 puro.

- 3) Determinar parámetros de transporte CCS, en este caso presión operacional mínima, caída de presión y densidad en la tubería y diámetro de la misma.
- 4) Comparar los parámetros de transporte para mezcla ternaria con los correspondientes a las dos binarias y al CO₂ puro.
- 5) Contribuir a la evaluación de la co-captura CO₂-SO₂ con otras impurezas (CH₄).

3. PARTE EXPERIMENTAL

3.1. Materiales

Se han utilizado para realizar los experimentos CO₂ (pureza $\geq 99,98\%$), CH₄ (pureza $\geq 99,995\%$) y SO₂ (pureza $\geq 99,90\%$) de la marca Air Liquide, sin posterior purificación.

3.2. Instrumentación y procedimiento

Para la determinación de la densidad a cada presión y temperatura (PpT) y el equilibrio líquido-vapor (ELV) se ha utilizado la instalación experimental que aparece más abajo (figura 1), con la que se puede trabajar en el rango de temperaturas comprendido entre 253,15 K y 423,15 K \pm 0,006 K y con presiones desde la atmosférica hasta 70 MPa con una precisión del 0,025%.⁸



Figura 1: Instalación experimental utilizada para la medida de densidades.

La estructura está formada, por un lado, por un circuito de medida que contiene la célula de densimetría, las conducciones de entrada y salida del flujo de la misma y las válvulas de regulación y corte del flujo, y por otro lado un conjunto de instrumentos para la medida de la presión, regulación y medida de la temperatura y toma de datos.

El componente principal de la instalación es una célula de densimetría de tubo vibrante (DTV), modelo DMA HPM de la marca Anton Paar KG, construida con una aleación de acero con níquel, molibdeno y cromo, que se utiliza fundamentalmente para medidas de densidad de líquidos y de

gases condensables. Está conectada a una unidad de evaluación mPDS 2000V3 a la cual se transmiten y leen los valores del periodo de vibración del tubo vibrante y la temperatura. Esta unidad de evaluación está diseñada para medidas de densidad en continuo.

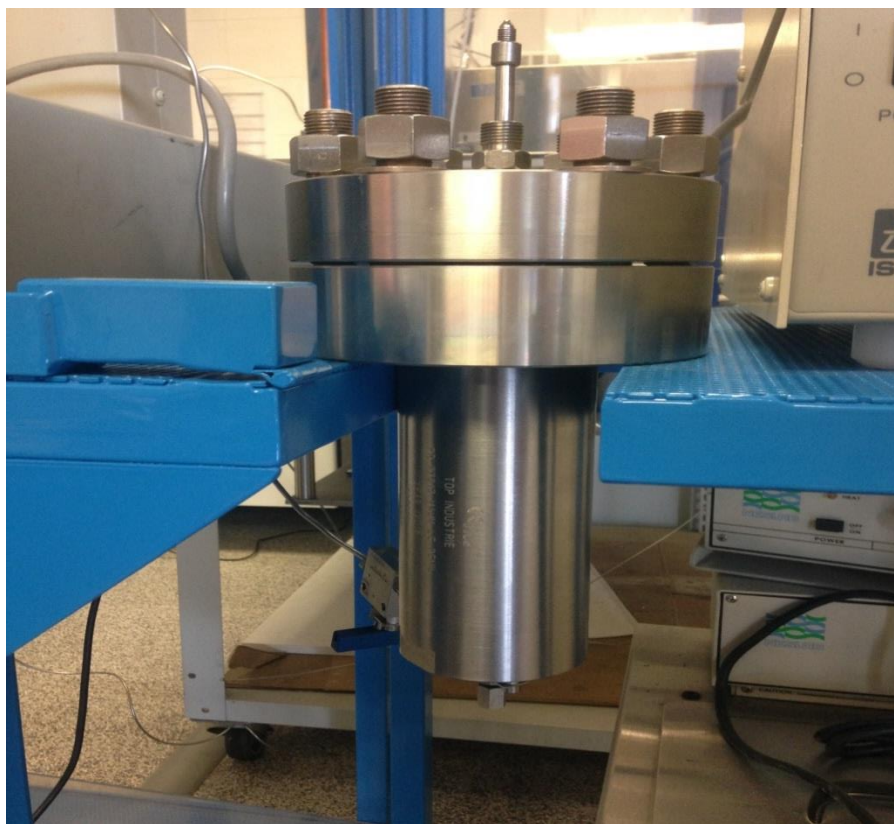


Figura 2: Célula de volumen variable utilizada.

La temperatura se mide mediante dos sondas de platino de 100 ohmios conectadas a una unidad de adquisición modelo 34970A de Agilent. Una sonda se encuentra dentro de la pared del tubo vibratorio y la otra dentro del baño líquido. La precisión en la medida de la temperatura es de $\pm 0,006$ K.

La presión se mide por medio de dos transductores de presión modelo PTX 611 entre 0-6 y 6-70 MPa, que están termorregulados y conectados al circuito de medida y a la unidad de adquisición de datos. Las precisiones observadas en la medición de la presión son de 0,0015 MPa para medidas de hasta 6 MPa, y de 0,0175 MPa para medidas entre 6 y 70 MPa.

Se utilizan dos baños termostatzados a dos temperaturas diferentes (ΔT de unos $0,3^{\circ}\text{C}$), uno para el densímetro y el otro para el resto de la instalación, para asegurar que la primera gota de líquido o la primera burbuja de vapor (puntos de rocío y burbuja respectivamente) se formen dentro del tubo vibratorio.

El fluido que se introduce en la instalación procede de una célula de volumen variable, con un volumen máximo de 0,51 L y una presión máxima de trabajo de 30 MPa (figura 2). Una bomba manual de alta presión permite alcanzar presiones en el fluido introducido de hasta 100 MPa.

Las mezclas se han preparado en la célula de volumen variable. Su composición se ha determinado por diferencia de pesada de los componentes que se introducen sucesivamente en la célula. La balanza que se utiliza es de la marca Sartorius, modelo CCE2004, cuya capacidad máxima de pesada es de 2500 g, la legibilidad de 0,1 mg y la repetibilidad dada por el fabricante mejor que 0,1 mg.

El funcionamiento del equipo se basa en que el periodo de vibración de un tubo que contiene un líquido cuya densidad se quiere conocer, es función de la masa del tubo y de la masa del líquido que contiene en su interior. La fórmula utilizada para calcular la densidad del líquido ha sido la siguiente:

$$\rho(P,T) = \rho_{ref}(P,T) \frac{\left(\frac{K(P,T)}{K_0(T)}\right) \tau^2(P,T) - \tau_0^2(T)}{\left(\frac{K(P,T)}{K_0(T)}\right) \tau_{ref}^2(P,T) - \tau_0^2(T)} \quad (1)$$

$\rho(P,T)$ = Densidad del fluido a determinar a temperatura T y presión P.

$\rho_{ref}(P,T)$ = Densidad del fluido de referencia.

$K(P,T)$ = Rigidez transversal del tubo vibrante a temperatura T y presión P.

$K_0(T)$ = Rigidez transversal del tubo vibrante a temperatura T y bajo vacío.

$\tau(P,T)$ = Periodo de vibración del tubo vibrante a temperatura T y presión P.

$\tau_0(T)$ = Periodo de vibración del tubo vibrante a temperatura T y bajo vacío.

$\tau_{ref}(P,T)$ = Periodo de vibración de referencia del tubo vibrante.

Mediante la instalación experimental que se ha descrito anteriormente se pueden tomar medidas de P- τ -T cada tres segundos. Sabiendo que el flujo del fluido durante la medida es de $0,05 \cdot 10^5$ Pa/s, en una isoterma realizada hasta $700 \cdot 10^5$ Pa se pueden medir hasta 4700 puntos aproximadamente, ⁸ número demasiado elevado para realizar su posterior tratamiento, por lo que un programa informático los reduce a unos 1500 puntos, para un manejo más asequible de los mismos.

Para evaluar la precisión de los resultados experimentales de la densidad se usa la ley de propagación de errores cuya ecuación es: ⁹

$$u_c(y) = \left[\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \right]^{1/2} \quad (2)$$

$u_c(y)$ = Incertidumbre estándar combinada de la propiedad y estimada.

x_i = Variables de entrada.

$(\partial f / \partial x_i)$ = Coeficiente de sensibilidad de la variable de entrada x_i .

$u^2(x_i)$ = Varianza de x_i .

La densidad, que es la variable medida, depende de la presión, temperatura, densidad de referencia (ρ_{CO2}), período de vibración (τ), período de vibración en el vacío (τ_0) y período de vibración con el

fluido de referencia (τ_{CO_2}). La contribución de la temperatura no se tiene en cuenta porque a lo largo de la isoterma es constante; ni la de la presión, ya que se ha comprobado que tiene poca influencia.

Por tanto, la incertidumbre combinada de la densidad se calcula:

$$u_c(\rho) = \left[\left(\frac{\partial \rho}{\partial \rho_{CO_2}} \right)^2 u^2(\rho_{CO_2}) + \left(\frac{\partial \rho}{\partial \tau} \right)^2 u^2(\tau) + \left(\frac{\partial \rho}{\partial \tau_0} \right)^2 u^2(\tau_0) + \left(\frac{\partial \rho}{\partial \tau_{CO_2}} \right)^2 u^2(\tau_{CO_2}) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Los valores de $u(\rho_{CO_2})$ se obtuvieron de la ecuación de Kunz-Wagner¹⁰ y son inferiores al 0,03% de la densidad. La incertidumbre en los periodos de vibración (τ) es 2×10^{-5} ms.⁸

3.3. Calibración

Para la calibración de la célula de densimetría se ha utilizado el modelo Forced Path Mechanical Calibration (FPMC) desarrollado por Bouchot y Richon en 2001, que es un procedimiento de calibrado para la determinación de densidades a partir del periodo de vibración, sencillo y preciso incluso en las regiones próximas a las críticas.¹¹ Se utiliza CO_2 con una pureza del 99,998% como fluido de referencia, ya que es el componente mayoritario de la mezcla objeto de este trabajo, se conocen bien sus propiedades PpT, pudiendo adquirir este producto con una pureza elevada, y existe una ecuación de estado precisa, (Kunz y Wagner)¹⁰ para este fluido, mediante la cual se pueden estimar densidades del mismo en el rango de presiones y temperaturas de trabajo con una precisión del 0,05%.

La ecuación del modelo FPMC es:

$$\rho(T,P) = \frac{M_0}{L_{00}} \left[\frac{1}{\pi r_i^2} \exp\left(\int \alpha(T) dT + \gamma_T P\right) \right] \left\{ \frac{\Delta r^4}{\Delta r_0^4} \exp(-3 \gamma_T P) \left(\frac{\tau^2}{\tau_0^2} \right) - 1 \right\} \quad (4)$$

donde

M_0 = Masa en el vacío del tubo vibrante.

L_{00} = Longitud en el vacío a 273,15 K.

Δr = Diferencia entre el radio externo e interno del tubo vibrante a la temperatura T y presión P.

Δr_0 = Diferencia entre el radio externo e interno del tubo vibrante a la temperatura T y en el vacío.

$\alpha(T)$ = Coeficiente de dilatación lineal.

τ = Periodo de vibración del tubo vibrante a la temperatura T y presión P.

τ_0 = Periodo de vibración del tubo vibrante a la temperatura T y bajo vacío.

γ_T = Coeficiente de expansión del tubo vibrante.

P = Presión en el interior del tubo vibrante.

Comparando la ecuación del modelo FMPC con la ecuación de estado se determinan los parámetros M_0/L_{00} y γ_T , que son independientes de la temperatura y de la presión.

3.4. Medida de las densidades

Antes de realizar cualquier medida se ajustan los parámetros que se quieren medir en el ordenador externo (periodo de vibración entre 2400 y 2700 μm , muestreo cada 3 segundos), controlando las temperaturas del baño termostatzado y del densímetro.

La presión se debe controlar con una válvula reguladora, una vez empezada la medida, para evitar cambios bruscos y obtener una variación adecuada con el tiempo.

En el caso de isothermas subcríticas, como lo son todas las que se han medido en este trabajo, la determinación experimental de las mismas se realiza en dos partes:

1) “Bajada”. Se parte de la presión máxima (20 MPa) y se va haciendo descender la presión paulatinamente hasta llegar al equilibrio. Por este método se determinan las densidades de la fase líquida en función de la presión a una determinada temperatura y estos datos se usan para determinar la presión de burbuja y la densidad de la fase líquida en el equilibrio a esa temperatura. La temperatura del circuito tiene que ser algo más baja que la del densímetro para asegurar que la primera burbuja de vapor se forma en el tubo vibrante.

2) “Subida”. Se parte de la presión atmosférica y se va aumentando la presión paulatinamente hasta llegar al equilibrio. Así se determina la densidad de la fase vapor en función de la presión a una determinada temperatura, y con estos datos se determina la presión de rocío y la densidad de la fase vapor en el equilibrio. La temperatura del circuito en este caso tiene que estar algo más alta que la del densímetro para asegurar que la primera gota de líquido se forma en el tubo vibrante.

3.5. Determinación de las propiedades del ELV

Los límites del ELV a cada temperatura, es decir, la presión de los puntos de rocío y de burbuja de las mezclas, y las densidades de las fases vapor y líquida en el equilibrio se determinan gráficamente, mediante el análisis de las medidas de densidad y presión realizadas alrededor de esos puntos con el programa incorporado Traitment. Se utiliza el método de las tangentes, a partir del cual, las medidas precedentes y posteriores a los puntos del límite del ELV se ajustan mediante dos ecuaciones lineales, y el punto de corte de ambas corresponde a los puntos de rocío o de burbuja, según la medida corresponda a la fase vapor o a la líquida respectivamente.

3.6. Medidas de seguridad

Dada la peligrosidad de los gases utilizados, se han utilizado medidas de seguridad para evitar problemas como campanas extractoras para manipular la muestra, un detector de gases, máscaras respiratorias y equipos autónomos de respiración. Los equipos de alta presión estaban encerrados entre paneles protectores.

El trabajo experimental ha sido realizado siempre bajo supervisión.

4. RESULTADOS

En este trabajo se han determinado experimentalmente cuatro isotermas PpT a las temperaturas de 263,15 K, 273,15 K, 293,15 K y 304,21 K para la mezcla ternaria $\text{CO}_2+\text{CH}_4+\text{SO}_2$ de composición $x_{\text{CO}_2} = 0,9344$, $x_{\text{CH}_4} = 0,0185$ y $x_{\text{SO}_2} = 0,0471$. La concentración de SO_2 se ha recomendado en la literatura como una posible composición de co-captura,⁴ y la de CH_4 se corresponde con el máximo de emisiones europeas y americanas.¹²⁻¹³

Los resultados se recogen en la tabla T1 del Anexo y en la figura 3 que se presenta a continuación, donde se compara con los correspondientes al CO_2 puro en las mismas condiciones de presión y temperatura.

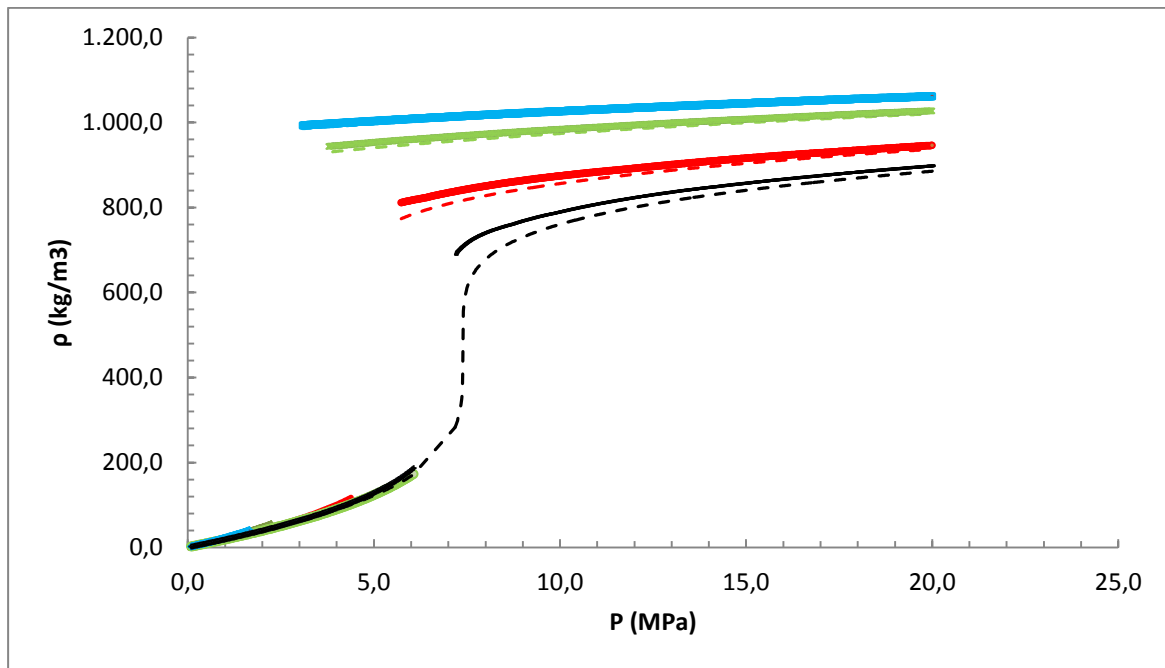


Figura 3. Densidades experimentales, ρ , a diferentes presiones y temperaturas de 263,15 K (azules), 273,15 K (verdes), 293,15 K (rojas) y 304,21 K (negras) para la mezcla ternaria $\text{CO}_2+\text{CH}_4+\text{SO}_2$, con $x_{\text{CO}_2} = 0,9344$, $x_{\text{CH}_4} = 0,0185$ y $x_{\text{SO}_2} = 0,0471$ (líneas continuas) y para el CO_2 puro (líneas de trazos).¹⁰

A continuación se presentan los resultados del ELV (tabla 1), donde se recogen datos experimentales de las presiones de burbuja y de rocío, y de las densidades del líquido y del vapor a las cuatro temperaturas:

CO_2 ($x=0,9344$) + SO_2 ($x=0,0472$) + CH_4 ($x=0,0185$)				
T (K)	$P_{\text{rocío}}$ (MPa)	P_{burbuja} (MPa)	ρ_L (kg/m³)	ρ_v (kg/m³)
263,15	1,656	3,090	993,15	40,42
273,15	2,251	3,787	943,45	54,38
293,15	4,383	5,730	811,38	117,52
304,21	6,071	7,182	689,05	186,17

Tabla 1: Límites del equilibrio líquido-vapor para la mezcla $\text{CO}_2+\text{SO}_2+\text{CH}_4$ estudiada.

5. DISCUSIÓN

5.1. Resultados de densidades y ELV

Se ha comparado el comportamiento de la mezcla ternaria $\text{CO}_2+\text{CH}_4+\text{SO}_2$, de composición $x_{\text{CO}_2} = 0,9344$, $x_{\text{CH}_4} = 0,0185$ y $x_{\text{SO}_2} = 0,0471$, con el del CO_2 puro¹⁰ y con el de las dos binarias CO_2+CH_4 con $x_{\text{CO}_2} = 0,9719$ y CO_2+SO_2 con $x_{\text{CO}_2} = 0,9532$, que son aproximadamente las composiciones que quedan si a la ternaria se le retira el CH_4 o el SO_2 , respectivamente, a las temperaturas de 263,15 K, 273,15 K, 293,15 K y 304,21 K. Estas mezclas binarias han sido estudiadas con anterioridad.^{5, 10, 14}

Como puede verse en la figura 3, la densidad de la mezcla aumenta al aumentar la presión y disminuir la temperatura, siendo siempre mayor que la del CO_2 puro en las mismas condiciones.

La densidad de la mezcla ternaria es siempre mayor que la de la binaria CO_2+CH_4 en las mismas condiciones, y menor que la de la binaria CO_2+SO_2 (figura 4). Se puede concluir que en la mezcla ternaria los efectos contrapuestos de las dos impurezas se compensan, quedando una situación intermedia, con densidades algo mayores que las de CO_2 puro.

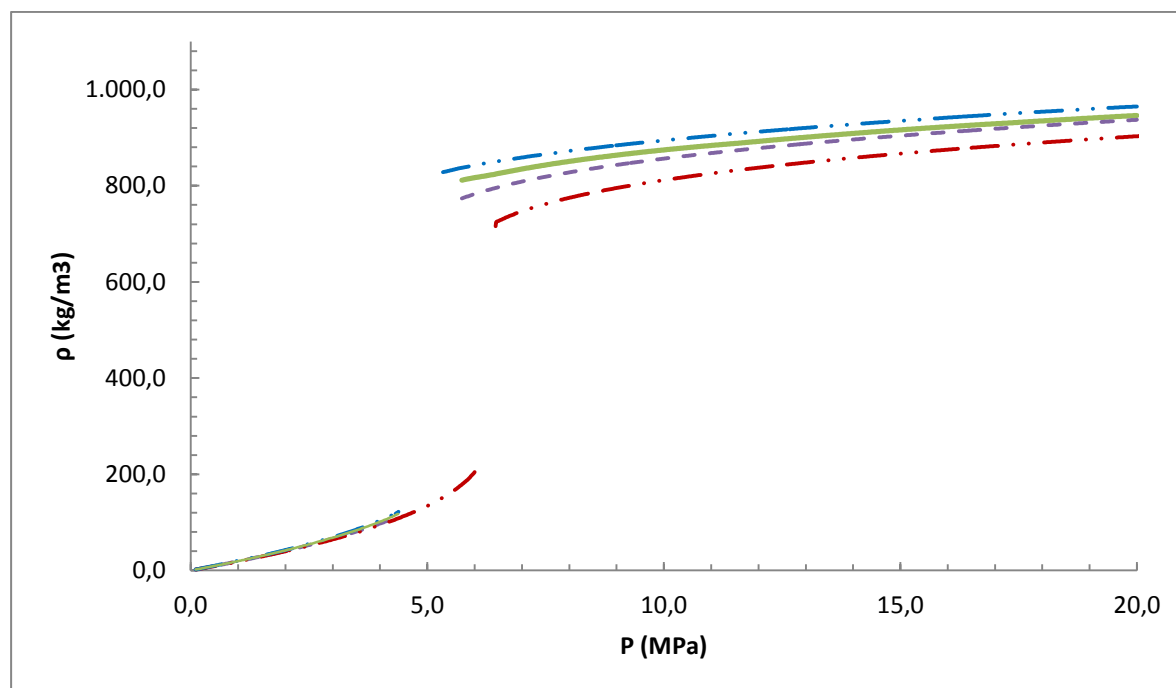


Figura 4. Densidades, ρ , a 293,15 K, para mezclas binarias de CO_2+CH_4 , con $x_{\text{CO}_2} = 0,9719$ (azul), CO_2+SO_2 , con $x_{\text{CO}_2} = 0,9532$ (roja), la ternaria de $\text{CO}_2+\text{CH}_4+\text{SO}_2$, con $x_{\text{CO}_2} = 0,9344$ y $x_{\text{CH}_4} = 0,0185$ (línea verde continua) y para el CO_2 puro (morada).

En la tabla 1 se presentan los resultados experimentales de presiones de burbuja y rocío y de las densidades del líquido y del gas del ELV a cada temperatura para la mezcla ternaria $\text{CO}_2+\text{CH}_4+\text{SO}_2$.

Se puede comprobar que tanto la presión de rocío como la de burbuja aumentan al aumentar la temperatura, la densidad de la fase líquida disminuye y la del vapor aumenta.

Se han comparado los resultados de presión de burbuja, de interés para CCS, con los de las dos mezclas binarias CO_2+CH_4 ⁵ y CO_2+SO_2 ¹⁴ y con el CO_2 puro⁸ (tabla T2 del Anexo). Se puede comprobar

que las presiones de burbuja de la mezcla ternaria son mayores que las de la mezcla CO_2+SO_2 y que las presiones de saturación del CO_2 puro, pero menores que las de la mezcla CO_2+CH_4 . En este caso también se puede decir que en la mezcla ternaria los efectos contrapuestos de las dos impurezas se compensan, quedando una situación intermedia, con presiones burbuja algo mayores que las de CO_2 puro.

La presencia de SO_2 , un gas condensable y más pesado que el CO_2 , hace aumentar la densidad de la mezcla y disminuir su presión de vapor. El CH_4 , gas no condensable y más ligero, hace disminuir la densidad de la mezcla y aumenta su presión de vapor. Ambos efectos contrapuestos se anulan parcialmente en la mezcla ternaria.

5.2. Efecto de las impurezas en el transporte (CCS)

Para estudiar el efecto de las impurezas SO_2 y CH_4 en el transporte del CO_2 antropogénico por tubería, se han determinado varios parámetros relacionados con él: presión mínima de transporte, caída de presión y densidad en la tubería y diámetro de la misma.

Estos tres últimos parámetros de transporte, así como otros requeridos para su determinación (número de Reynolds, factor de fricción y caída de presión por unidad de longitud) se han calculado utilizando las ecuaciones recomendadas en la literatura y que se recogen en la tabla T3 del Anexo.¹⁵

Los valores de densidades de la mezcla ternaria utilizados han sido los determinados experimentalmente en este trabajo, mientras que los de viscosidades se han calculado con el programa REFPROP 9.0.¹⁶

Los datos correspondientes a las mezclas binarias y al CO_2 puro se han obtenido de la literatura.^{5, 10,14}

5.2.1. Presión operacional mínima

Los límites del equilibrio líquido-vapor para la mezcla ternaria, las binarias y el CO_2 puro a las distintas temperaturas se representan en la tabla 1 y en la tabla T2 del Anexo. La presión operacional mínima deberá ser superior a la presión de burbuja del fluido, ya que no debe haber cambios de fase durante el transporte. La presencia de burbujas de gas y turbulencias pueden dañar la tubería. Además se transporta menos masa si hay fase gas. Por tanto, la presión mínima de transporte tiene que ser siempre mayor que la de burbuja, siendo esta última el límite superior del equilibrio líquido-vapor.

Se puede comprobar en la misma tabla que para la mezcla ternaria estos valores de presión son ligeramente mayores que los de CO_2 puro a 293,15 K. Al añadir CH_4 (gas no condensable y más ligero que el CO_2), aumenta la presión de vapor de sistema, y el mínimo valor de presión requerido en la tubería es mayor que para el CO_2 puro. Al añadir SO_2 (gas condensable más pesado que el CO_2) la presión de vapor disminuye, y el valor mínimo de la presión operacional se hace menor. En la mezcla ternaria ambos efectos se compensan quedando una presión operacional mínima ligeramente superior a la del CO_2 puro.

5.2.2. Caídas de presión y densidad a lo largo de la tubería

En las figuras 5 y 6 se representan los perfiles de presión y densidad a lo largo de la tubería para la mezcla ternaria y para el CO₂ puro a las cuatro temperaturas estudiadas. Se ha considerado una tubería de características intermedias dentro de las encontradas en la literatura, con un diámetro, $D=0,508\text{ m} = 20\text{ pulgadas}$, un flujo másico, $m=317\text{ kg/s} = 10\text{ Mt/año}$, un factor de rugosidad, $e=4,6 \cdot 10^{-5}\text{ m}$ y una presión inicial, $P_{\text{iny}}=20\text{ MPa}$.¹⁷

Se puede comprobar que estas caídas son mayores a temperaturas altas y mayores para el CO₂ puro que para la mezcla ternaria. Cuanto mayor sea la caída de presión, se recorre menos longitud de tubería antes de llegar a la presión de burbuja, donde se hace necesaria la recompresión.

En las figuras 7 y 8 se comparan el comportamiento de la mezcla ternaria, las dos mezclas binarias y el CO₂ puro, representando gráficamente las caídas de presión y densidad de las tres mezclas y el CO₂ puro a 293,15 K. Se puede comprobar que la binaria con CH₄ tiene una caída de presión más rápida que para el CO₂ puro, la binaria con SO₂ una caída más lenta, y en la ternaria ambos efectos contrapuestos se compensan y queda una situación intermedia, con caídas más lentas que las de CO₂ puro. Esto se debe a las diferencias de densidad y viscosidad en las distintas mezclas entre sí y con el CO₂ puro.

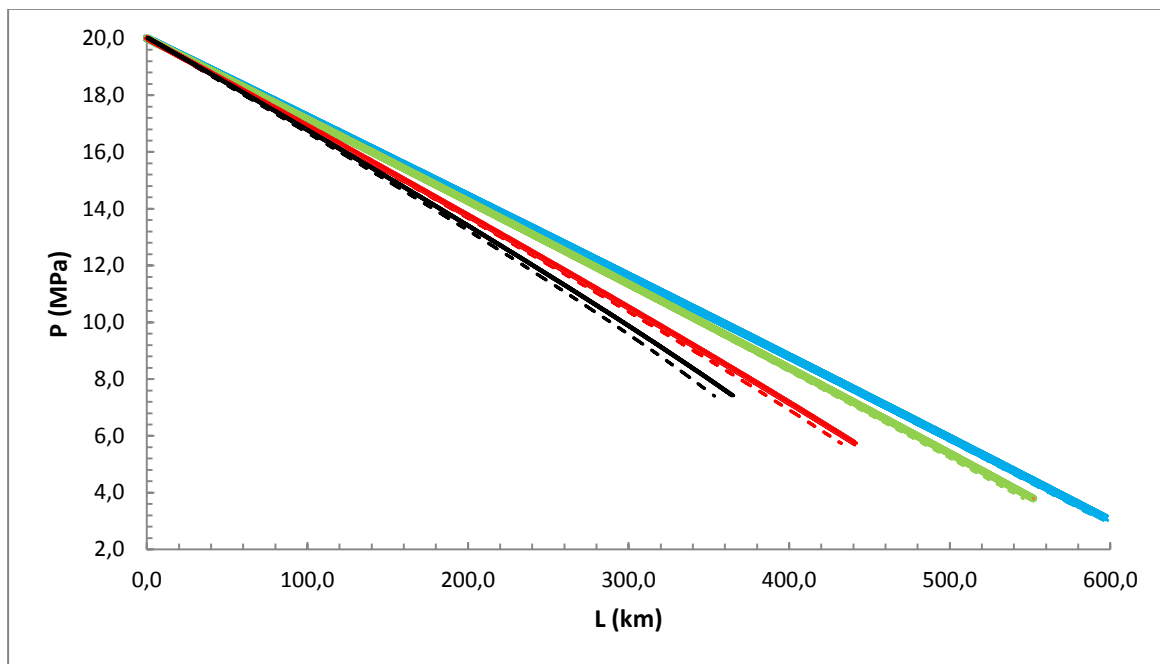


Figura 5. Variación de la presión, P , con la distancia en el transporte por tubería para la mezcla ternaria CO₂+CH₄+SO₂, con $x_{\text{CO}_2} = 0,9344$, $x_{\text{CH}_4} = 0,0185$ y $x_{\text{SO}_2} = 0,0471$ (líneas continuas) y para el CO₂ puro (líneas de trazos), a temperaturas de 263,15 K (azules), 273,15 K (verdes), 293,15 K (rojas) y 304,21 K (negras), con un $D=0,508\text{ m}$, $m=317,1\text{ kg/s}$, $e=4,6 \cdot 10^{-5}\text{ m}$ y $P_{\text{iny}}=20\text{ MPa}$.

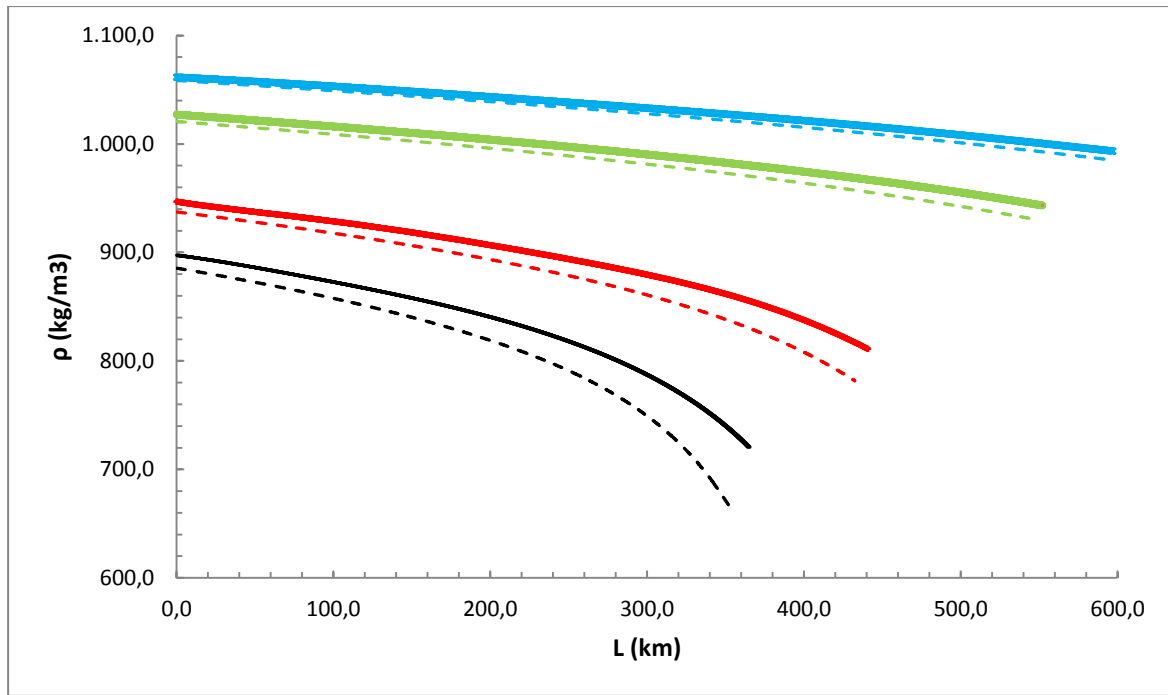


Figura 6. Variación de la densidad, ρ , con la distancia en el transporte por tubería para la mezcla ternaria $\text{CO}_2+\text{CH}_4+\text{SO}_2$, con $x_{\text{CO}_2} = 0,9344$, $x_{\text{CH}_4} = 0,0185$ y $x_{\text{SO}_2} = 0,0471$ (líneas continuas) y para el CO_2 puro (líneas de trazos), a temperaturas de 263,15 K (azules), 273,15 K (verdes), 293,15 K (rojas) y 304,21 K (negras), con un $D = 0,508$ m, $m = 317,1$ kg/s, $e = 4,6 \cdot 10^{-5}$ m y $P_{\text{iny}} = 20$ MPa.

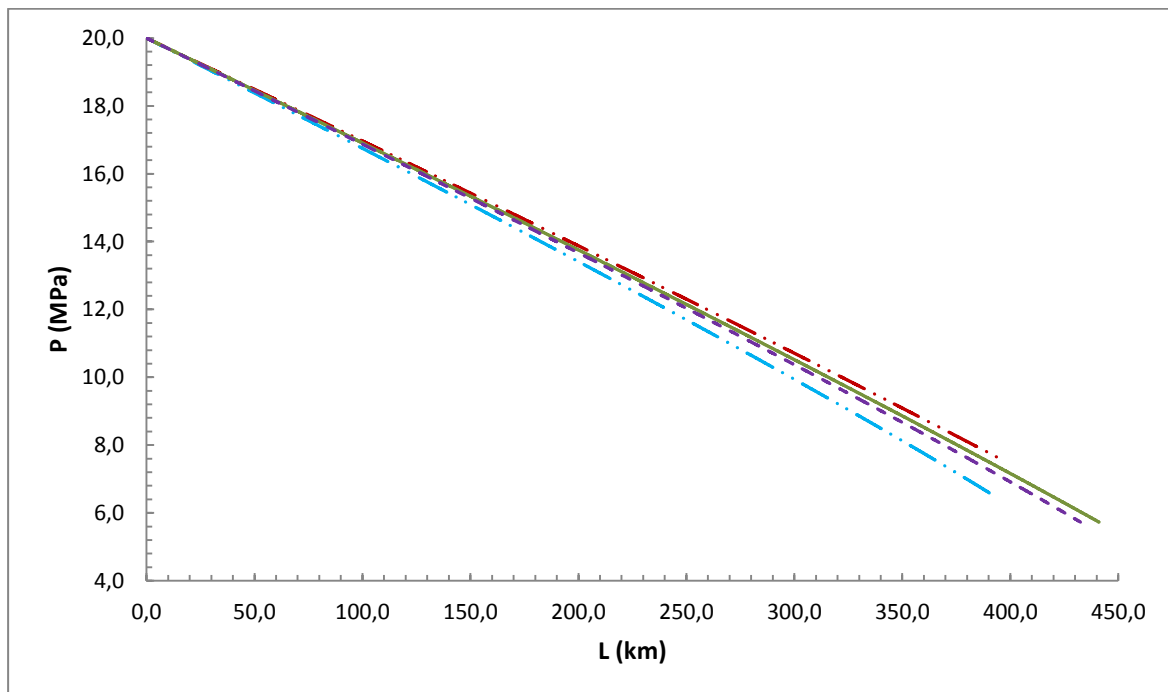


Figura 7. Variación de la presión a 293,15 K en el transporte por tubería, para mezclas binarias de CO_2+CH_4 , con $x_{\text{CO}_2} = 0,9719$ (azul), CO_2+SO_2 , con $x_{\text{CO}_2} = 0,9532$ (roja), la ternaria de $\text{CO}_2+\text{CH}_4+\text{SO}_2$, con $x_{\text{CO}_2} = 0,9344$, $x_{\text{CH}_4} = 0,0185$ y $x_{\text{SO}_2} = 0,0471$ (línea verde continua) y para el CO_2 puro (morada).

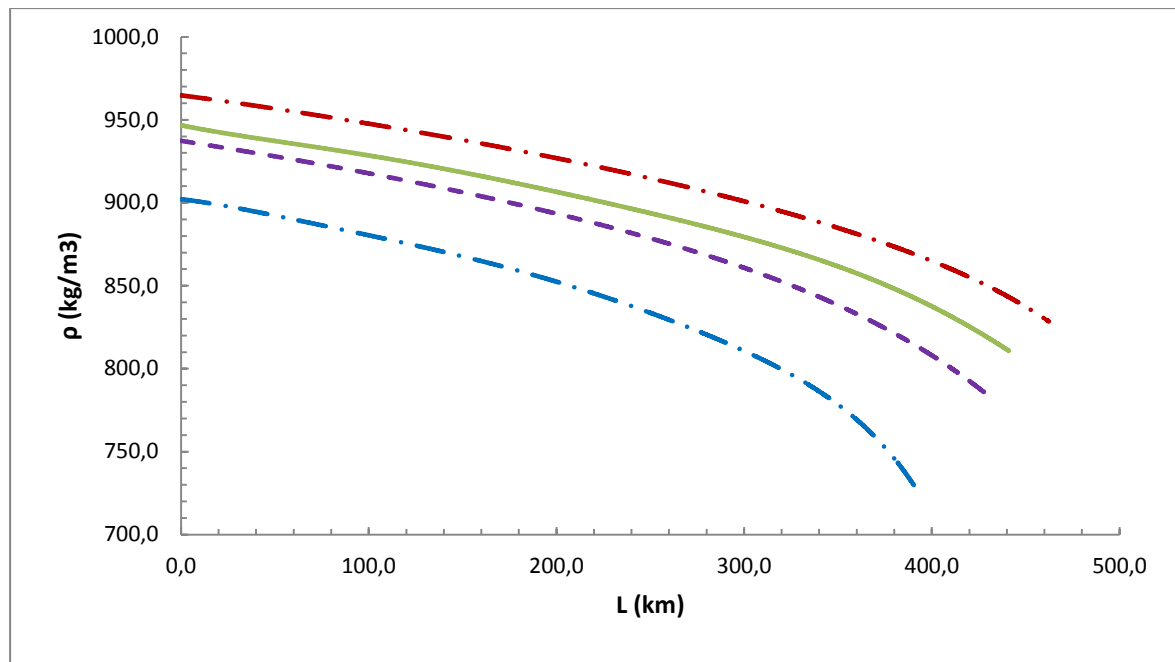


Figura 8. Densidades, ρ , a 293,15 K, para mezclas binarias de CO_2+CH_4 , con $x_{\text{CO}_2} = 0,9719$ (azul), CO_2+SO_2 , con $x_{\text{CO}_2} = 0,9532$ (roja), la ternaria de $\text{CO}_2+\text{CH}_4+\text{SO}_2$, con $x_{\text{CO}_2} = 0,9344$ y $x_{\text{CH}_4} = 0,0185$ (línea verde continua) y para el CO_2 puro (morada).

5.2.3. Diámetros de tubería

Las figuras 9, 10 y 11 representan los diámetros de tubería necesarios para transportar un flujo másico determinado a las presiones estudiadas de 20 MPa, 14 MPa y 8 MPa en una tubería con un factor de rugosidad, $e = 4,6 \cdot 10^{-5} \text{ m}$ y una caída de presión por unidad de longitud, $\Delta P/L$ promedio de 31 Pa/m. A temperaturas altas y a presiones bajas se necesita un diámetro de tubería mayor, debido a la menor densidad del fluido. Se puede comprobar que para transportar el mismo flujo másico se necesita en todos los casos un diámetro menor para la mezcla ternaria que para el CO_2 puro, siendo el efecto más acusado cuanto mayor es la temperatura.

La figura 12 representa el diámetro de la tubería necesario para transportar un flujo másico determinado, a la presión de 14 MPa y a la temperatura de 293,15 K para las dos mezclas binarias, para la ternaria y para el CO_2 puro. Se comprueba que la binaria con CH_4 necesita un diámetro mayor que el CO_2 puro para transportar el mismo flujo, la binaria con SO_2 necesita un diámetro menor, y que en la ternaria ambos efectos contrapuestos se compensan y queda una situación intermedia, con diámetros más pequeños que para el CO_2 puro, debido de nuevo a las diferencias de densidad y viscosidad de las distintas mezclas entre sí y con el CO_2 puro.

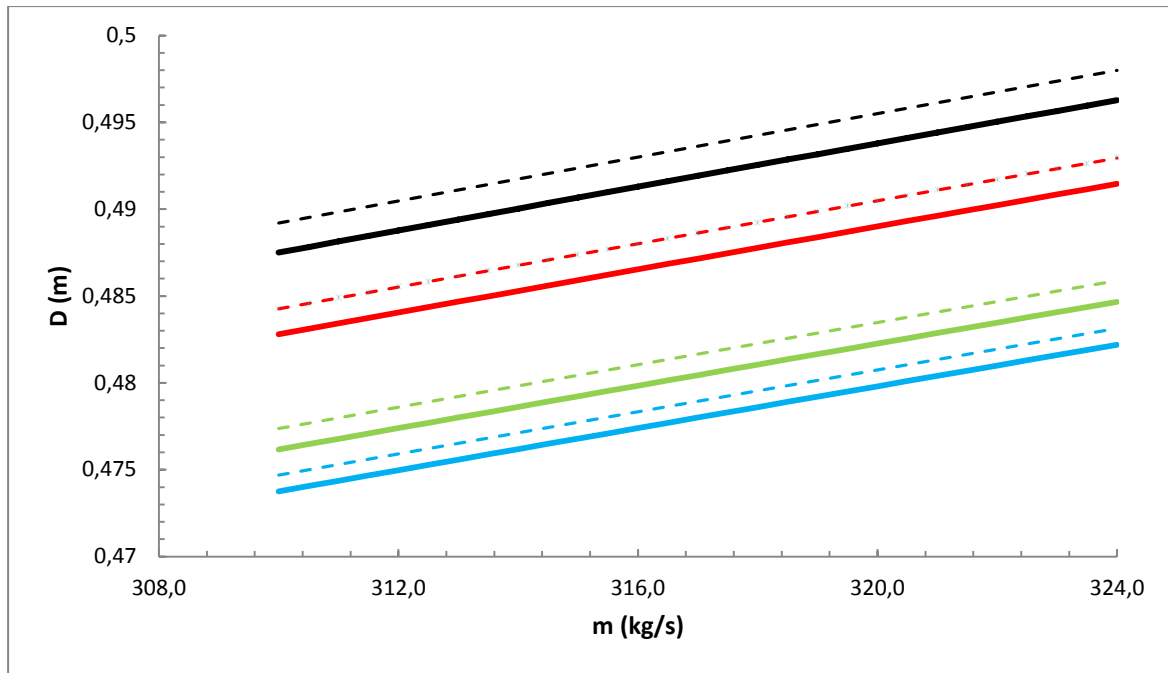


Figura 9. Diámetro de la tubería necesario para transportar un flujo másico, m , a $P=20$ MPa, para la mezcla ternaria $\text{CO}_2+\text{CH}_4+\text{SO}_2$, con $x_{\text{CO}_2} = 0,9344$, $x_{\text{CH}_4} = 0,0185$ y $x_{\text{SO}_2} = 0,0471$ (líneas continuas) y para el CO_2 puro (líneas de trazos), a temperaturas de 263,15 K (azules), 273,15 K (verdes), 293,15 K (rojas) y 304,21 K (negras), con un $\Delta P/L = 31$ Pa/m y un $e = 4,6 \cdot 10^{-5}$ m.

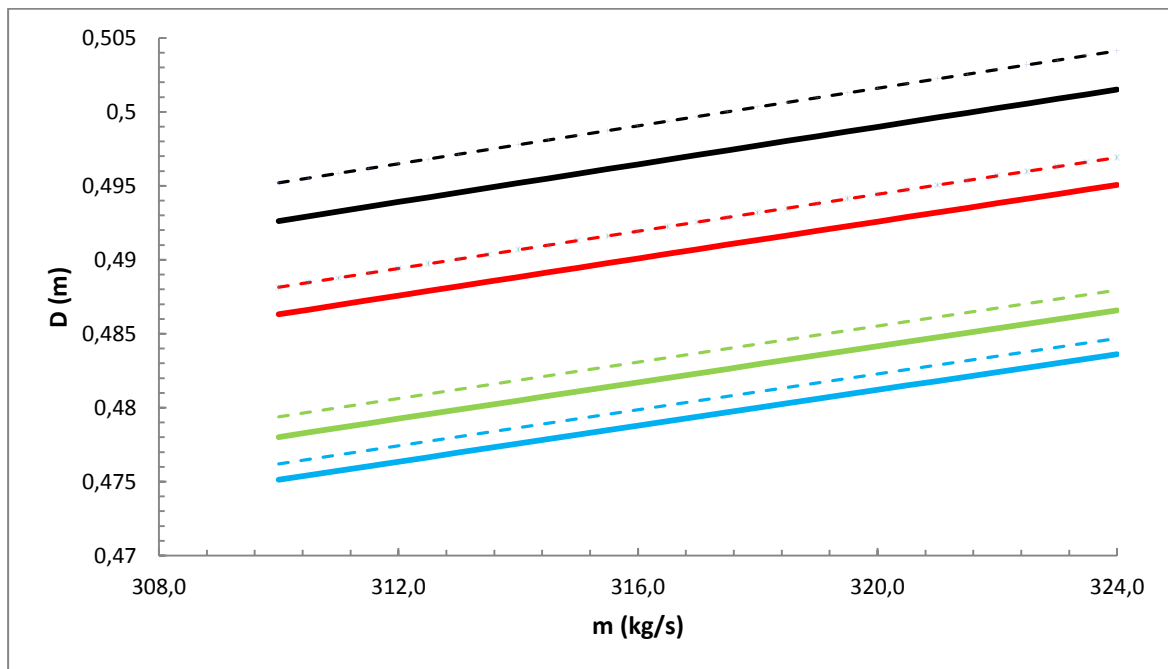


Figura 10. Diámetro de la tubería necesario para transportar un flujo másico, m , a $P=14$ MPa, para la mezcla ternaria $\text{CO}_2+\text{CH}_4+\text{SO}_2$, con $x_{\text{CO}_2} = 0,9344$, $x_{\text{CH}_4} = 0,0185$ y $x_{\text{SO}_2} = 0,0471$ (líneas continuas) y para el CO_2 puro (líneas de trazos), a temperaturas de 263,15 K (azules), 273,15 K (verdes), 293,15 K (rojas) y 304,21 K (negras), con un $\Delta P/L = 31$ Pa/m y un $e = 4,6 \cdot 10^{-5}$ m.

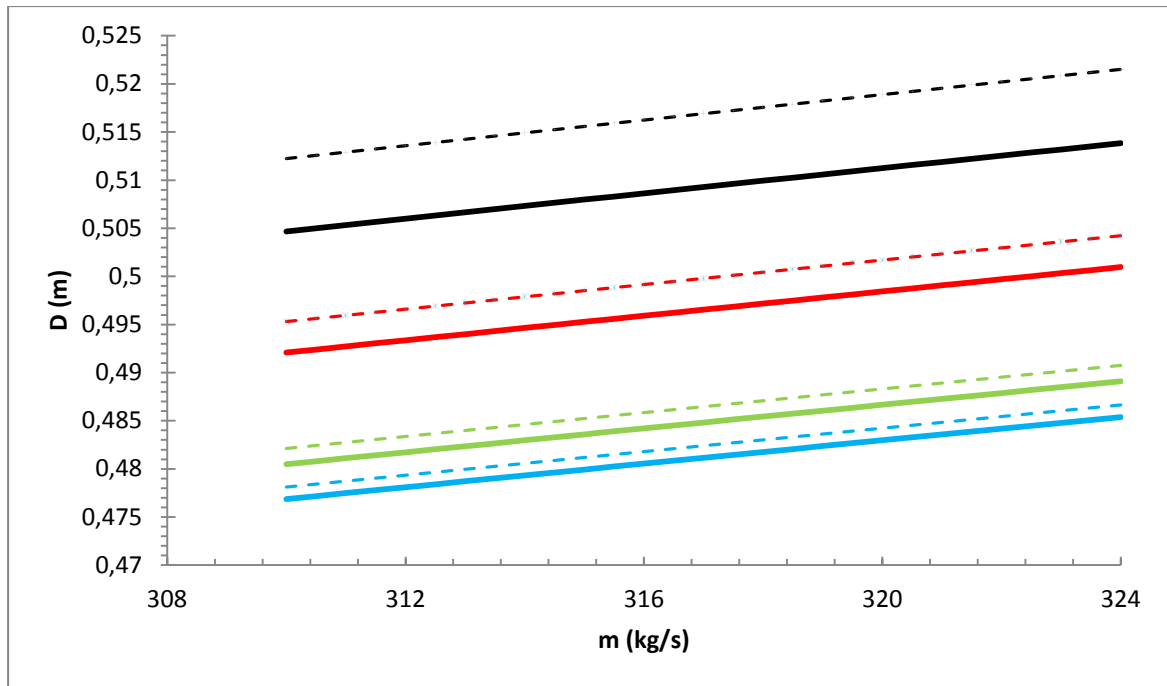


Figura 11. Diámetro de la tubería necesario para transportar un flujo másico, m , a $P=8$ MPa, para la mezcla ternaria $\text{CO}_2+\text{CH}_4+\text{SO}_2$, con $x_{\text{CO}_2} = 0,9344$, $x_{\text{CH}_4} = 0,0185$ y $x_{\text{SO}_2} = 0,0471$ (líneas continuas) y para el CO_2 puro (líneas de trazos), a temperaturas de 263,15 K (azules), 273,15 K (verdes), 293,15 K (rojas) y 304,21 K (negras), con un $\Delta P/L = 30,93$ Pa/m y un $e = 4,6 \cdot 10^{-5}$ m.

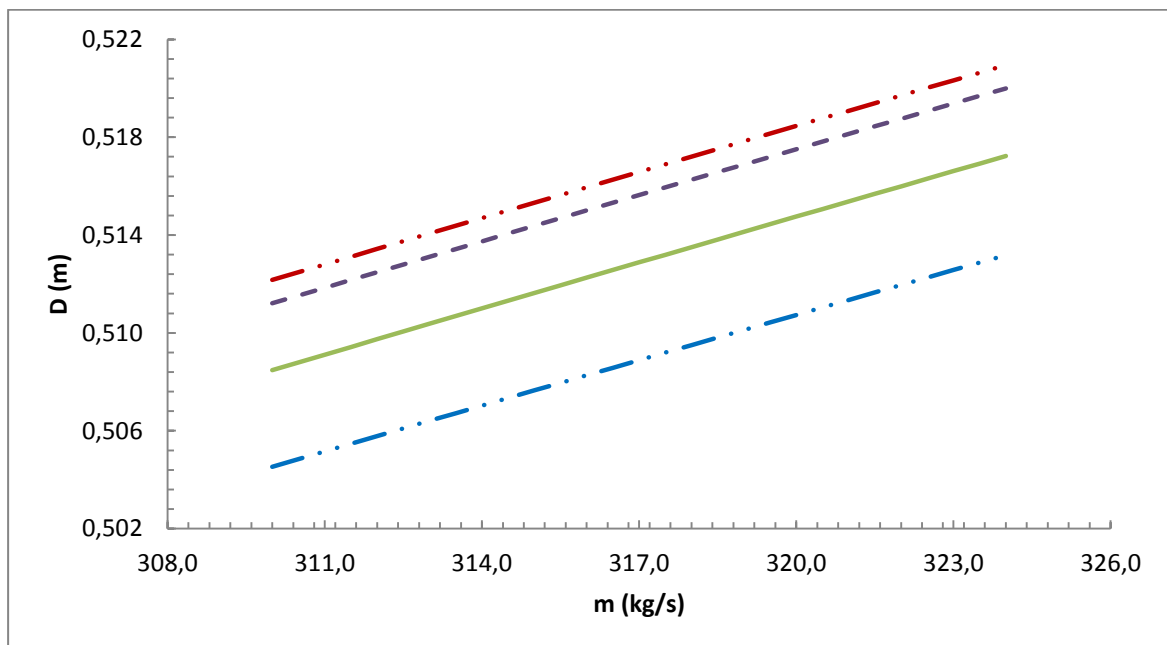


Figura 12. Diámetro de la tubería necesario para transportar un flujo másico, m , a $P=14$ MPa y 293,15 K, para mezclas binarias de CO_2+CH_4 , con $x_{\text{CO}_2} = 0,9719$ (roja), CO_2+SO_2 , con $x_{\text{CO}_2} = 0,9532$ (azul), la ternaria de $\text{CO}_2+\text{CH}_4+\text{SO}_2$, con $x_{\text{CO}_2} = 0,9344$, $x_{\text{CH}_4} = 0,0185$ y $x_{\text{SO}_2} = 0,0471$ (línea verde continua) y para el CO_2 puro (morada).

6. CONCLUSIÓN

La presencia de impurezas en el CO_2 antropogénico afecta en gran medida a las propiedades y posterior comportamiento del fluido, modificando así los parámetros utilizados en el diseño y operación de las distintas etapas de la tecnología CCS.

El transporte del CO_2 se debe realizar en fase densa o supercrítica, evitando que se produzca un cambio de fase durante la operación, fijando una presión operacional mínima mayor que la de burbuja.

En este trabajo se han llevado a cabo medidas de la densidad en función de la presión y temperatura y del ELV para la mezcla ternaria $\text{CO}_2+\text{CH}_4+\text{SO}_2$, con una composición en fracción molar de 0,9344, 0,0185 y 0,0472, respectivamente, a las temperaturas de 263,15 K, 273,15 K, 293,15 K y 304,21 K en el intervalo de presiones desde 0,1 MPa hasta 20 MPa.

Se han comparado los resultados con las mezclas binarias CO_2+CH_4 y CO_2+SO_2 y con el CO_2 puro en las mismas condiciones, cuyos datos se han obtenido de la literatura. Se han calculado varios parámetros de transporte: presión operacional mínima, caída de presión y densidad en la tubería y diámetro de la misma, que también se han comparado con los correspondientes a las dos mezclas binarias y al CO_2 puro.

Se ha comprobado que los valores de densidad de la mezcla ternaria son mayores que los del CO_2 puro y la binaria con CH_4 y menores que los de la mezcla binaria con SO_2 . El SO_2 hace aumentar la densidad de la mezcla mientras que el CH_4 la hace disminuir. En la mezcla ternaria los efectos contrapuestos de las dos impurezas se compensan, quedando una situación intermedia, con densidades algo mayores que las de CO_2 puro.

En el transporte, ambas impurezas presentan también efectos contrapuestos. Con CH_4 el valor mínimo de la presión operacional aumenta, mientras que con SO_2 disminuye. Las caídas de presión y densidad son más rápidas con CH_4 y más lentas con SO_2 , y se necesita un diámetro de tubería mayor con CH_4 que con SO_2 para transportar el mismo flujo másico.

Se puede concluir que en la mezcla ternaria los efectos contrapuestos de estas impurezas se compensan, quedando una situación intermedia, con un comportamiento respecto al transporte moderadamente mejor que el del CO_2 puro. Así, la presencia de SO_2 favorece el transporte, compensando el efecto negativo de la presencia de CH_4 . En la mezcla estudiada, con 5% de SO_2 y 3% de CH_4 , el resultado final es que se favorece el transporte con respecto al comportamiento del CO_2 puro y de la mezcla binaria con CH_4 , lo que habla en favor de la co-captura CO_2 - SO_2 también en presencia de CH_4 .

1. The Guardian, U.S. Energy Information Administration.

<https://www.eia.gov/beta/international/data/browser/#/?pa=000000000000000000000002&c=ruvwwwfvvtvnnv1urvwwwfvvvvvfvvvou20evvvvvvvvvnnvuvo&ct=0&vs=INTL.44-8-AFG-MMTCD.A&vo=0&v=H&start=1980&end=2014>

<http://hub.globalccsinstitute.com/sites/default/files/publications/201158/global-status-ccs-2016-summary-report.pdf>

4. M. Koenen, S. Waldmann, C. Hofstee, F. Neele, 2nd International Forum on Recent Developments of CCS Implementation 16th – 17th December 2015.

6. Y. Xiang, Z. Wang, C. Xu, C. Zhou, Z. Li, W. Ni, J. Supercrit. Fluids, 2011, 58, 286-294.

7. S.G. Sayegh, F.F. Krause, J.E. Fosti, SPE Petroleum Reservoir Eng., 1987, 2, 199-208

8. I. Velasco, C. Rivas, J.F. Martínez-López, S.T. Blanco, S. Otín, M. Artal, J. Phys. Chem. B, 2011, 115, 8216-8230.

9. Joint Committee for Guides in Metrology, JCGM 100, 2008.

10. O. Kunz, R. Klimeck, W. Wagner, M- Jaeschke, GERG Technical Monograph 15, Fortschritt-Berichte VDI-Verlag, Düsseldorf 2007.

11. C. Bouchot, D. Richon, *Fluid Phase Equilib.*, 2001, 191, 189-208.

12. Annual European Union greenhouse gas inventory 1990–2014 and inventory report 2016; EEA Report No 15/2016; EEA (European Environment Agency) 2012;
<http://www.eea.europa.eu/publications/european-union-greenhouse-gas-inventory-2016>

13. Inventory of U.S. greenhouse gas emissions and sinks: 1990 – 2014; EPA 430-R-16-002; U.S. Environmental Protection Agency 2016;
<https://www3.epa.gov/climatechange/Downloads/ghgemissions/US-GHG-Inventory-2016-Main-Text.pdf>

14. Datos pendientes de publicación.

15. P.N. Seevam, J.M. Downie, P. Hopkins, Proceedings of IPC2008, 7th International Pipeline Conference, 2008, 1, 39-51.

16. E.W. Lemmon, M.L. Huber, M.O. McLinden, National Institute of Standards and Technology, Standard Reference Data Program, Gaithersburg, 2013.

17. IEA Greenhouse Gas R&D Programme (IEAGHG), *Development of a global CO₂ pipeline infrastructure*, 2010.
<http://www.globalccinstitute.com/publications/development-global-co2-pipeline-infraestructure->

ANEXOS

Tabla T1: Datos experimentales P- ρ - $u_c(\rho)$ para la mezcla

CO₂ (x=0,9344) + SO₂ (x=0,0472) + CH₄ (x=0,0185) a diferentes temperaturas: 263,15 K; 273,15 K; 293,15 K y 304,21 K.

T = 263,15 K					
P (MPa)	ρ (kg/m ³)	$u_c(\rho)$ (kg/m ³)	P (MPa)	ρ (kg/m ³)	$u_c(\rho)$ (kg/m ³)
0,100	2,06	0,23	10,503	1028,52	0,39
0,510	10,80	0,22	11,010	1030,48	0,39
1,014	22,64	0,22	11,518	1032,5	0,39
1,502	35,45	0,22	12,007	1034,32	0,39
1,660	39,92	0,22	12,515	1036,10	0,39
3,093	993,15	0,38	13,004	1038,04	0,39
3,506	995,42	0,38	13,512	1039,95	0,39
4,014	998,15	0,38	14,001	1041,74	0,39
4,503	1000,84	0,38	14,508	1043,59	0,39
5,011	1003,49	0,38	15,016	1045,41	0,39
5,500	1006,00	0,38	15,505	1047,15	0,39
6,008	1008,56	0,38	16,013	1048,90	0,39
6,516	1011,00	0,38	16,502	1050,59	0,39
7,005	1013,27	0,38	17,010	1052,31	0,39
7,512	1015,64	0,39	17,518	1053,99	0,39
8,001	1017,86	0,39	18,006	1055,53	0,39
8,506	1020,12	0,39	18,514	1057,10	0,40
9,017	1022,34	0,39	19,003	1058,59	0,40
9,506	1024,41	0,39	19,511	1060,08	0,40
10,014	1026,47	0,39	20,000	1061,57	0,40

T=273,15 K					
P (MPa)	ρ (kg/m ³)	$u_c(\rho)$ (kg/m ³)	P (MPa)	ρ (kg/m ³)	$u_c(\rho)$ (kg/m ³)
0,100	2,02	0,23	10,517	985,96	0,38
0,513	10,50	0,23	11,003	988,45	0,38
1,012	21,54	0,23	11,508	991,00	0,38
1,512	33,52	0,23	12,013	993,56	0,38
2,011	47,07	0,23	12,500	995,92	0,38
2,251	54,38	0,23	13,005	998,38	0,38
3,787	943,45	0,23	13,509	1000,70	0,38
4,008	945,00	0,37	14,014	1002,98	0,38
4,513	948,86	0,37	14,501	1005,07	0,38
5,000	952,65	0,37	15,006	1007,17	0,38
5,505	956,28	0,37	15,511	1009,26	0,38
6,009	959,60	0,37	16,016	1011,41	0,38
6,514	962,79	0,37	16,502	1013,44	0,38
7,001	965,96	0,37	17,007	1015,49	0,39
7,506	969,17	0,37	17,512	1017,50	0,39
8,011	972,24	0,38	18,017	1019,54	0,39
8,515	975,22	0,38	18,504	1021,44	0,39
9,002	978,11	0,38	19,008	1023,32	0,39
9,507	980,83	0,38	19,513	1025,26	0,39
10,012	983,40	0,38	20,000	1027,01	0,39

T=293,15 K					
P (MPa)	ρ (kg/m ³)	$u_c(\rho)$ (kg/m ³)	P (MPa)	ρ (kg/m ³)	$u_c(\rho)$ (kg/m ³)
0,100	1,91	0,23	10,514	879,37	0,35
0,509	9,64	0,23	11,014	883,82	0,35
1,003	19,49	0,23	11,515	887,95	0,36
1,520	30,68	0,23	12,015	892,35	0,36
2,014	42,23	0,23	12,515	896,74	0,36
2,509	54,64	0,23	13,015	900,22	0,36
3,004	68,42	0,23	13,515	904,98	0,36
3,520	84,21	0,23	14,016	908,82	0,36
4,014	101,92	0,23	14,516	912,60	0,36
4,383	117,52	0,23	15,016	916,16	0,36
5,727	811,38	0,34	15,516	919,58	0,36
6,013	816,89	0,34	16,016	923,35	0,36
6,513	825,65	0,34	16,517	925,90	0,36
7,013	834,95	0,34	17,017	928,88	0,36
7,513	843,29	0,35	17,517	931,78	0,37
8,013	850,77	0,35	18,017	934,38	0,37
8,514	857,50	0,35	18,517	937,79	0,37
9,014	863,71	0,35	19,000	940,56	0,37
9,514	869,38	0,35	19,500	943,31	0,37
10,014	874,51	0,35	20,000	946,06	0,37

T=304,21 K					
P (MPa)	ρ (kg/m ³)	$u_c(\rho)$ (kg/m ³)	P (MPa)	ρ (kg/m ³)	$u_c(\rho)$ (kg/m ³)
0,100	1,89	0,23	10,501	809,98	0,34
0,520	9,56	0,23	11,015	814,41	0,34
1,000	18,70	0,23	11,512	824,71	0,34
1,510	29,00	0,23	12,010	828,48	0,34
2,020	39,90	0,23	12,507	834,87	0,34
2,500	50,93	0,23	13,004	840,83	0,34
3,010	63,56	0,23	13,502	846,47	0,34
3,520	77,43	0,23	14,015	854,86	0,35
4,000	91,79	0,23	14,513	856,76	0,35
4,510	108,94	0,23	15,010	861,34	0,35
5,020	128,84	0,23	15,507	866,03	0,35
5,500	151,4	0,24	16,005	870,44	0,35
6,071	186,17	0,24	16,502	874,67	0,35
7,182	720,89	0,52	17,000	878,82	0,35
7,501	733,99	0,33	17,513	882,93	0,35
8,014	752,72	0,33	886,64	882,78	0,35
8,512	767,28	0,33	18,508	890,48	0,35
9,009	779,61	0,33	19,005	894,12	0,36
9,507	789,98	0,33	19,503	897,57	0,36
10,004	799,09	0,33	20,000	900,20	0,36

Tabla T2: Límites del equilibrio líquido-vapor para las mezclas binarias $\text{CO}_2 + \text{CH}_4$ ¹ y $\text{CO}_2 + \text{SO}_2$ ² a diferentes temperaturas:

	CO₂ puro	CO₂(x=0,9809)+CH₄(x=0,0191)	CO₂(x=0,9532)+SO₂(x=0,0468)
T (K)	P_{sat} (MPa)	P_{burbuja} (MPa)	P_{burbuja} (MPa)
263,15	2,649	3,150	2,580
273,15	3,485	3,983	3,263
293,15	5,729	6,210	5,316
304,21	Tª crítica	Tª supercrítica	6,689

¹ S.T. Blanco, C. rivas, R. Bravo, J. Fernández, M. Artal, I. Velasco, Environ. Sci. Technol., 2012, 46, 13016-13023

² Datos pendientes de publicación.

Tabla T3: Ecuaciones generales para el cálculo de los parámetros de transporte en el diseño y operación de tuberías:

	Ecuaciones	Símbolos
Flujo de masa	$m = \rho \times v \times A$	m = flujo de masa (kg/s) ρ = densidad del fluido (kg/m ³) v = velocidad del fluido (m/s) A = área interna de la tubería
Diámetro interno de la tubería	$D = \left(\frac{4 \times m}{v \times \pi \times \rho} \right)^{1/2} =$ $= \left(\frac{8 \times f \times m^2}{\rho \times \pi^2 \times \frac{\Delta P}{L}} \right)^{1/5}$	D = diámetro interno (m) m = flujo de masa (kg/s) v = velocidad del fluido (m/s) ρ = densidad del fluido (kg/m ³) f = factor de fricción Darcy-Weisbach $(\Delta P/L)$ = caída de presión por metro (Pa/m)
Número de Reynolds	$Re = \frac{\rho \times v \times D}{\eta} = \frac{4 \times m}{\pi \times \eta \times D}$	Re = número de Reynolds ρ = densidad del fluido (kg/m ³) v = velocidad del fluido (m/s) D = diámetro interno (m) η = viscosidad del fluido (Pa.s) m = flujo de masa (kg/s)
Factor de fricción Darcy-Weisbach	$f = \frac{1,325}{[\ln[\frac{e}{3,7 \times D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}}]]^2}$	f = factor de fricción Darcy-Weisbach e = factor de rugosidad (m) D = diámetro interno (m) Re = número de Reynolds
Caída de presión	$\frac{\Delta P}{L} = \frac{8 \times f \times m^2}{\rho \times \pi^2 \times D^5}$	$(\Delta P/L)$ = caída de presión por metro (Pa/m) m = flujo de masa (kg/s) ρ = densidad del fluido (kg/m ³) f = factor de fricción Darcy-Weisbach D = diámetro interno (m)