



IKER  
GAZTE  
NAZIOARTEKO  
IKERKETA EUSKARAZ

## V. IKERGAZTE

NAZIOARTEKO IKERKETA EUSKARAZ

2023ko maiatzaren 17, 18 eta 19a  
Donostia, Euskal Herria

ANTOLATZAILEA:  
Udako Euskal Unibertsitatea (UEU)



Aitortu-PartekatuBerdin 3.0

## INGENIARITZA ETA ARKITEKTURA

**Nahasketa bitarren Soret  
koefizientearen neurketa  
ingurune porotsuan**

*Irene Cantabrana Pérez de Luco,  
Peru Fernandez-Arroiabe  
Txapartegi, Valentina Shevtsova,  
Mohammed Mounir Bou-Ali Saidi,  
Abdelkader Mojtabi eta  
Pierre Costeseque*

207-213 or.

<https://dx.doi.org/10.26876/ikergazte.v.03.27>

ANTOLATZAILEA:



BABESLEAK:



LAGUNTZAILEAK:



## Nahasketa bitarren Soret koefizientearen neurketa ingurune porotsuan

Irene Cantabrana Pérez de Luco<sup>1</sup>, Peru Fernandez-Arroiabe Txapartegi<sup>1</sup>, Valentina Shevtsova<sup>2</sup>, Mohammed Mounir Bou-Ali<sup>1</sup>, Abdelkader Mojtabi<sup>3</sup>, Pierre Costeseque<sup>3</sup>

*Fluidoan Mekanika taldea, Mondragon Unibertsitatea<sup>1</sup>*

*Ikerbasque, Zientziarako Euskal Fundazioa<sup>2</sup>*

*Université de Toulouse, I.M.F.T UMR CNRS/INP/UPS<sup>3</sup>*

[irene.cantabrana@alumni.mondragon.edu](mailto:irene.cantabrana@alumni.mondragon.edu)

### Laburpena

Artikulu honetan ingurune porotsuan Soretten oinarritzko zelula gisa ezagutzen den prozedura esperimentalak baliozkotzeko jarraitutako prozesua deskribatzen da. Horretarako, lehenik eta behin, prozesuaren funtsezko aldagaiak aztertu dira zenbakizko simulazioen bitartez, zelularen zeharretan tenperaturaren transmisioa eta nahasketaren osagaien bereizketa, besteak beste. Horren ondoren, hidrokarburo eta ur-nahasketa ezberdinekin saiakuntza esperimentalak egin dira; baita Soret koefiziente positibo zein negatiboa duten nahasketekin ere.

Hitz gakoak: termodifusioa, Soret koefizientea, ingurune porotsua, nahasketa bitarrak.

### Abstract

*This paper describes the process followed for the validation of the experimental procedure known as Soret elementary cell in porous media. First, numerical simulations of the key parts of the process have been carried out; these being the temperature transmission and the separation of components. Once this phase was completed, experimental tests were carried out with samples based on hydrocarbons and aqueous mixtures; and with both positive and negative Soret coefficients.*

*Keywords: thermodiffusion, Soret coefficient, porous media, binary mixtures.*

## 1. Sarrera eta motibazioa

Garraio fenomenoak sistema ezberdinen arteko masa, energia edota higidura kantitate hartumana bezala definitzen dira. Masaren garraioari dagokionez, bi mekanismo ezberdinei esker sortzen da osagai ezberdinen mugimendua: tenperatura eta masa. Masa fluxuaren magnitudea, hurrengo ekuazioaren arabera definitzen da nahasketa bitarrentzat (Sanjuan et al., 2022):

$$\vec{J}_i = -\rho D \vec{\nabla} c_i - \rho D_{T,i} c_0 (1 - c_0) \vec{\nabla} T \quad (1)$$

Non  $\vec{J}_i$   $i$  osagaiaren masa-fluxua den,  $\rho$  nahasketaren dentsitatea,  $D$  nahasketaren espezieen difusio koefizientea,  $c_i$  nahasketaren  $i$  osagaiaren masa-frakzioa,  $\nabla c$  eta  $\nabla T$  masa-frakzioaren eta tenperaturaren gradienteak diren, hurrenez hurren eta  $D_T$  nahasketaren termodifusio koefizientea. Ekuazio hau ingurune libre zein porotsuetan erabil daiteke, difusio eta termodifusio koefizienteetan ingurune porotsuaren eragina kontuan hartzen baitu (Saghir et al., 2005).

Mekanismo hauen artean, Soret koefizientea ( $S_T$ ) da magnitudearik esanguratsuena eta termodifusio ( $D_T$ ) eta difusio ( $D$ ) koefizienteen arteko zatiketa bezala definitzen da. Egoera geldikorrean; hau da,  $\vec{J}_i = 0$  denean, Soret koefizientea hurrengo ekuazioaren bidez adierazten da (Costeseque et al., 2003):

$$S_T^* = \frac{D_T^*}{D} = S_T = \frac{\Delta c}{\Delta T c_0 (1 - c_0)} \quad (2)$$

Non  $c_0$  nahasketaren hasierako masa frakzioa den. Nahasketa bitarren kasuan, Soret koefizientearen ikurrak eta magnitudeak migrazioaren noranzkoa eta intentsitatea adierazten dute. Ikurra positiboa bada ( $S_T > 0$ ), nahasketa termofobikoa dela esaten da eta osagairik dentsuena

ingurune hotzera mugituko da. Aldiz, koefizientearen ikurra negatiboa bada ( $S_T < 0$ ), termofilikoa deritzo eta osagairik dentsoena ingurune berorantz joango da (Errarte et al., 2020).

Garraio fenomenoaren aplikazioak oso ugariak dira eta, ondorioz, naturan garrantzi handia hartzen dute. Izan ere, petrolioaren industrian nahasketa ezberdinen difusio eta Soret koefizienteak ezagutzeak petrolioaren berreskurapenean hobekuntzak ekar ditzake (Jang eta Yang, 2022). Bestalde, errektiboaren garraioaren eta hidrogeologiaren alorretan ikerketa asko bultzatu dira ingurune porotsuan nahasketa ezberdinek duten portaera ulertzeko (Berkowitz et al., 2016). Gainera, “falling film absorbers” deritzon teknika hobetzeko, nahasketa akuosoen propietateak ikertzeko zenbait ekimen sortu dira (Mahamoudou et al., 2022). Azkenik, biomedikuntzaren alorrean nanofluidoaren portaerak (Basir et al., 2021) eta ingurune porotsuen ezaugarriak substantzien garraioan duten eraginak interes handia piztu dute (Vyas et al., 2016).

## 2. Arloko egoera eta ikerketaren helburuak

Soret efektua aurkitu zenetik, hainbat ikerketa taldetan interesa piztu du jakintza arlo honek. Talde hauek ikerketa ezberdinak burutu zituzten, baina XX mendearen amaieran egin zen lehendabiziko neurketa-kanpaina internazionala: Fontainebleau-ko Benchmark-a (Platten et al., 2003). Kanpaina honetan bost ikerketa taldek 1,2,3,4-tetrahidronaftalenoz (THN), isobutilbenzenoz (IBB) eta dodekanoz ( $C_{12}$ ) osatutako nahasketa bitar eta ekimasikoen Soret koefizientea neurtu zuten teknika ezberdinak erabiliz. Nahasketa hauek aukeratu zituzten petrolio gordinaren konposizioaren antza handia dutelako.

Horren ondoren, osagai horien nahasketa hirutarren Benchmark-a burutu zen (Bou-Ali et al., 2015), eta beste neurketa kanpaina batzuk sortu ziren nazioarteko mailan. Hasteko, DCMIX proiektuan, nahasketa ezberdinekin mikrograbitategian zein lurreko baldintzetan esperimenduak egin ziren beren Soret koefizienteak zehazteko (Braibanti et al., 2019). SCCO nazioarteko proiektua osagai anitzeko nahasketetara (bi osagai baino gehiago) zuzenduta dago, petrolioaren erazketan aurrerapenak egiteko helburuarekin (Galliero et al., 2017).

Soret koefizientea neurtzeko teknika esperimentalei dagokionez, hainbat teknika ezberdin erabili dira proiektu hauetan. Adibidez, besteak beste, Fontainebleau-eko Benchmark-ean zutabe termograbitazionalak erabili ziren, bai ingurune libre (Blanco et al., 2008) eta baita porotsuan ere (Platten eta Costèsque, 2004). Zutabe hauen bidez nahasketen termodifusio koefizientea kalkulatu zuten. DCMIX proiektuan, difusio koefizientea kalkulatzeko “Sliding Symmetric Tubes” (SST) teknika erabili zen (Larrañaga et al., 2014). Bi teknika hauek nahasketaren dentsitatearen aldaketetan oinarritzen dira eta biak konbinatuz, Soret koefizientea kalkulatu daiteke. Sistema optikoetan oinarritutako teknikei dagokienez, berriz, “Optical Beam Deflection” (OBD) (Königer et al., 2009) edo “Optical Digital Interferometry” (ODI) (Mialdun eta Shevtsova, 2008) topa ditzakegu. Bi teknika hauek laser baten errefrakzio-indizearen aldaketetan oinarritzen dira Soret koefizientea kalkulatzeko.

Aurreko teknika guztiekin ez da posible Soret negatibodun nahasketak neurtzea grabitate baldintzetan ordea. Hortaz, lan honen xedea nahasketa bitarrentzat Soret-en zelula elementalaren teknikaren balidazio osoa burutzea da. Teknika honen bidez, Soret koefiziente positiboa eta negatiboa duten nahasketak zuzenean neurtu baitaitezke. Teknika esperimentalak balioztatzeko hurrengo azpi helburuak definitu dira:

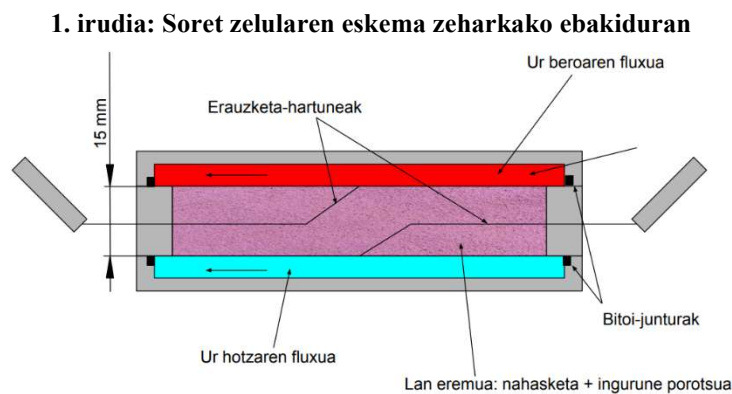
- Gailu esperimentalak aztertzea eta teknikaren funtzionamendu printzipio fisikoa ulertzea, prozedura esperimentalak finkatuz.
- Teknikaren analisi numerikoa burutzea, tenperatura diferentziak eta nahastearen osagaien banaketa aztertuz.
- Bibliografian aztertutako Soret koefiziente positibodun eta negatibodun nahasketak neurtzea.

### 3. Ikerketaren muina

Atal honetan ikerketan definitu ziren azpi helburuak nola garatu diren azaltzen da. Lehenik, Soret zelularen geometria eta erabiltze-prozesua garatu dira. Ondoren, egindako simulazio numerikoak argitu dira eta azkenik, prozedimendu eta emaitza esperimentalak azaldu dira.

#### 3.1 Gailuaren eta prozedimendu esperimentalaren deskribapena

1. irudian adierazten denez, gailu esperimentalak altzairu herdoilgaitzeko bi plakez eta PVC-ko gap batez osatuta dago. Bi bainu termostatikoei esker (LAUDA ProLine RP 855 eta RC 6), altzairuzko plaken barrutik ura tenperatura kontrolatua garraiatzen da. Gap-ak 380×90×15 mm-tako lan eremua sortzen du. Entseguetan nahasmenduak ekiditeko, dimentsio hauek guztiz konstanteak izan behar dute luzera osoan zehar. Gainera, Soret zelulak hamabi erauzketa hartune ditu; sei goiko aldera zuzenduta eta beste seiak beheko aldera. Lan eremuaren hermetikotasuna bermatzeko pieza guztien artean bitoi-juntura bat sartu da.



Prozedura esperimentalak hasteko, gap-ak sortzen duen lan eremua nahasteaz eta material porotsuz bete behar da. Kasu honetan, ingurune porotsua sortzeko 200-300  $\mu\text{m}$ -ko diametroa duten beirazko esferak erabili dira. Ondoren, goiko taparekin gailu esperimentalak ixten da eta posizio bertikalean jartzen da. Posizio horretan fluidoak behetik gora sartzen da, beirazko esferen artean geratu diren aire burbuilak kanporatuz. Fluidoak goiko aldetik burbuilik gabe irteten denean, gailu esperimentalak posizio horizontalera itzuli behar da.

Honen ostean, goiko eta beheko paretetan tenperatura diferentzia bat ezartzen da. Nahasketaren Soret koefizientea positiboa bada, behetik hotza aplikatzen zaio eta goitik beroa. Aldiz, Soret koefizientea negatiboa bada, alderantziz aplikatu behar dira tenperaturak. Modu honetan osagairik dentsioa behera desplazatuko dela bermatzen da.

Masa-frakzio zein Soret koefizientearen analisiak beti egoera geldikorrean burutu dira. Goiko eta beheko paretetan arteko masa-frakzio diferentzia zehazteko, erauzketen dentsitatea neurtu behar da, eta  $\beta$  dilatazio koefizientearen bidez masa-frakzioa kalkulatu da.

#### 3.2 Balioztatze numerikoa

Gailu esperimentalak numerikoki balioztatzen hasteko, lehendabizi lan eremuko tenperatura banaketa simulatu da. Horretarako, 3D-ko geometriak eta sareak egin dira. Sarearekiko independentzia frogatu ostean, 600000 zelda dituen hexcore sarea erabili da.

Analisi numerikoa egiteko ANSYS Fluent softwarea erabili da. Bertan programatutako ereduak, Navier-Stokes ekuazioetan oinarrituta dago, eta ekuazio hauek ebazteko presioan oinarritutako "solver"-a erabili da. Simulazioa hauetan ez denez nahasketaren osagaien banaketa aztertzen, nahasketa fluido bakar bat izango balitz bezala programatu da. Ingurune porotsua isotropikotzat hartu da, hau da, propietateak norabide guztietan konstante direla suposatuta da.

Fluent programan sarrerako tenperaturak ezartzeko, Soret zelulan esperimentalki lortutako datuak erabili dira. Horrela, kanpoan neurtu daitekeen eta barruan dagoen tenperatura diferentzia

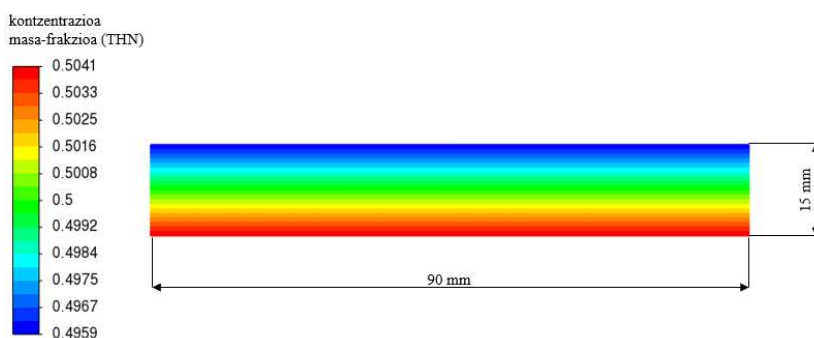
erreala lortu dira. Adibidez, THN-C<sub>12</sub> nahasketa ekimasikoaren kasuan, kanpoaldean 15.3 °C-tako diferentzia neurtu zen eta simulazioek barnean 10.5 °C-tako diferentzia zegoela balioetsi zuten; hau da, %33-ko diferentzia dago neurtutakoaren eta kalkulaturakoaren artean. Soret koefizientea kalkulatzeko, nahasketa bakoitzean Fluentek balioetsitako tenperatura erabili da.

Osagaien bereizketari eta Soret koefizienteari dagokionez, bi dimentsiotako domeinu konputazionala erabili da. Tenperaturaren simulazioetan ezarri diren baldintzaz gain, simulazio hau difusio termiko eta masikoaren ekuazioetan oinarrituta dago. Flotagarritasun indarrak kontuan hartzeko, Boussinesq-en hurbilketa erabili da (Naumann et al., 2012):

$$\rho = \rho_0(1 - \alpha(T - T_0) + \beta(c - c_0)) \tag{3}$$

Non  $\rho$ ,  $T$  eta  $c$  kalkulua burutzen den puntuko dentsitatea, tenperatura eta masa-frakzioa diren eta  $\rho_0$ ,  $T_0$  eta  $c_0$  nahasketa homogeen dentsitatea, tenperatura eta masa-frakzioa.  $\alpha$  eta  $\beta$  tenperatura eta masa dilatazio koefizientei dagozkie, hurrenez hurren. Paretetan definitu den baldintza ez-irristadura baldintza izan da eta 10 °C-tako tenperatura diferentzia ezarri da.

**2. irudia: THN-IBB nahasketa ekimasikoaren masa-frakzio profila 10°C-tako tenperatura diferentziarekin.**



2. irudian ikusten den moduan, osagaien bereizketa norabide bertikalean ematen da. Osagairik dentsoena (THN) beherantz higitzen da eta bestea (IBB), aldiz, gorantz;  $8.20 \times 10^{-3}$  ko banaketa ( $\Delta c$ ) . Gainera, (2) ekuazioa aplikatuz gero,  $S_T = 3.28 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  lortzen da. Balio honek literaturako balioekin %1eko baino desbiderapen baxuagoa du eta, ondorioz, zenbakizko modeloa balioztat hartuko da.

**3.3 Balioztatze esperimentalak**

Behin prozedura esperimentalak definituta eta zenbakizko modeloen balioztatzea burututa, bibliografian aztertutako nahasketen Soret koefizienteak neurtu dira. Alde batetik eremu positiborako, Benchmark-eko hiru nahasketa ekimasikoak (THN-IBB, THN-C<sub>12</sub> eta IBB-C<sub>12</sub>), tolueno-hexano (Tol-C<sub>6</sub>) 0.5167ko tolueno masa frakzioarekin, ura-etanol (H<sub>2</sub>O-Eth) 0.4ko ur masa-frakzioarekin eta ura-2-isopropanol (H<sub>2</sub>O-Isop) 0.5eko ur masa-frakzioarekin aukeratu dira. Bestalde, negatiboen kasuan, ura-etanol (H<sub>2</sub>O-Eth) eta ura-2-isopropanol (H<sub>2</sub>O-Isop), bietan 0.9ko ur masa-frakzioarekin erabili dira.

Soret koefizientea (2) ekuazioaren bitartez kalkulatu da. Hortaz, nahasketa guztientzat  $\Delta c$ ,  $\Delta T$  eta  $c_0$  ezagutu behar dira.  $c_0$  nahasketa prestatzerakoan kalkulatu daiteke.  $\Delta T$  aurreko simulazio numerikoa jarraituz kalkulatu da 0.1 °C-tako zehaztasunez.  $\Delta c$ , aldiz, modu esperimentalean neurtu da 0.000005 g/cm<sup>3</sup>-ko zehaztasuna daukan dentsimetro batekin. 1. taulan, bi nahasketen adibidea jasotzen da:

**1. taula: balidaziorako nahasketekin lortutako emaitzen adibideak.**

Nahasketa	$c_0$	$\Delta T$ (°C)	$\Delta c$	$S_T/10^{-3}$ (K <sup>-1</sup> )	$S_T/10^{-3}$ (K <sup>-1</sup> ) liter.
THN-IBB	0.5	14.0	0.0123	3.49	3.3
H <sub>2</sub> O-Eth	0.9	-15.4	0.0093	-6.73	-6.75

Temperatura aldaketak aurreko simulazioekin lortutako emaitzen bidez kalkulatu dira; Soret koefizientearen emaitzen balioa temperaturarekin zuzenki lotuta baitago. Beraz, oso garrantzitsua da  $\Delta T$  zehaztasunez ezagutzea.

Gainontzeko nahasketen emaitzak kontuan hartuta, % -3.3-ko desbiderapena lortu da Soret koefiziente positibodun nahasketetan eta % 1.8-koa negatibodunetan. Hortaz, egiazta daiteke Soret-en zelula ingurune porotsuetan neurtzeko, prozedura esperimentalak balioztatuta geratzen dela.

#### 4. Ondorioak

Hasteko, emaitza esperimentalen desbiderapenak aztertu dira. Aztertutako nahasketen artean batez-besteko desbiderapen absolutua % 3.5ekoa izan da. Balio horrekin, teknika esperimentalak guztiz balidatuta geratzen dela nahasketa bitar positibo eta negatiboentzat, esan daiteke.

Bestalde, simulazio numerikoak eta emaitza esperimentalak aztertu ostean, eta teknika honen inguruan aurretik zegoen literatura aztertuta (Costesèque et al., 2003), (Costesèque et al., 2004), ondorengo ondorioak atera daitezke. Hasteko, nahasketa guztien temperatura analisia egitearen garrantzia azpimarratu nahi da. Izan ere, neurtutako (gailu esperimentalean temperatura kanpoko horman neurtzen da) eta benetan fluidoari aplikatutako temperatura diferentzien artean %33 inguruko aldea dago. Emaitzen konparaketa zuzena bermatzeko parametro hau zehaztasun handiarekin ezagutu behar denez, simulazio numerikoetan lortutako temperatura diferentziak erabili dira balidazioan, neurtutako temperaturekin fluidoari benetan aplikatutakoa zehazteko. Gainera, nahasketaren eroankortasun termikoaren menpekoak dira bero galerak. Hortaz, nahasketaz edo masa-frakzioz aldatzerakoan, analisia berriro egin behar da Soret koefizientearen emaitzen doitasuna bermatzeko.

Azkenik, ingurune porotsuaren konbekzio eza aztertu da. Grabitadedun ingurune batean Soret negatibodun nahasketak neurtzea oso zaila izaten da, konbekzio indarrak agertzen baitira. Kasu honetan, nahiz eta horma hotza goikaldean egon, abiadura profilak guztiz linealak dira. Ondorioz, osagaien mugimendua guztiz difusiboa da eta ez dago inolako konbekzio indarrik.

#### 5. Etorkizunerako planteatutako norabidea

Behin teknika esperimentalak balioztatuta, ildo honetatik ikertzen jarraitzeko hurrengo ekintzak proposatzen dira:

- Gap-aren dimentsioak kontuan hartuta, 0.5 l-tako nahasketa-bolumena behar da Soret koefizientea neurtzeko. Nahasketaren osagaiak oso garestiak direnean, horren bolumen handiak behar izateak arazoak ekar ditzake. Beraz, komenigarria izango litzateke gailuaren diseinu berri bat egitea, beharrezko fluido bolumena gutxitzeko.
- Behin teknika esperimentalak nahasketa bitar positibo eta negatiboetan erabilgarria dela frogatuta, oraindik literaturan neurtuta ez dauden nahasketak neurtzeko aukera sortzen da. Ikerketa eremu askotan interesa piztu du termodifusio efektuak. Hortaz, energien munduan edota medikuntza arloan garrantzia izan dezaketen Soret koefizientea neurtzeko aukera dago.
- Ikerketa honetan egoera geldikorra bakarrik aztertu da; hau da, nahasketaren osagaiak egonkortu direnean. Hala ere, egoera iraunkorrean azterketak egitea interesgarria izango litzateke, osagai bakoitzaren mugimendua denboraren zehar aztertu ahal izateko.
- Naturan agertzen diren nahasketak normalean milaka osagai izaten dituztenez, hiru eta lau osagaien teknika hau balioztatzea interesgarria izango litzateke.

#### 6. Erreferentziak

Basir, M. F. M., Shehzad, S. A., & Rauf, A. (2021). On the features of Stefan blowing magnetized flow of bioconvected nanofluid through slip conditions. In B. Mahanthesh (Ed.), *Advances in Convective*

- Instabilities and Incompressible Fluid Flow* (pp. 103–120). De Gruyter. <https://doi.org/doi:10.1515/9783110696080-005>
- Berkowitz, B., Dror, I., Hansen, S. K., & Scher, H. (2016). Measurements and models of reactive transport in geological media. In *Reviews of Geophysics* (Vol. 54, Issue 4, pp. 930–986). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1002/2016RG000524>
- Blanco, P., Mounir Bou-Ali, M., Platten, J. K., Urteaga, P., Madariaga, J. A., & Santamaria, C. (2008). Determination of thermal diffusion coefficient in equimolar n-alkane mixtures: Empirical correlations. *Journal of Chemical Physics*, 129(17). <https://doi.org/10.1063/1.2945901>
- Bou-Ali, M. M., Ahadi, A., Alonso de Mezquia, D., Galand, Q., Gebhardt, M., Khlybov, O., Köhler, W., Larrañaga, M., Legros, J. C., Lyubimova, T., Mialdun, A., Ryzhkov, I., Saghir, M. Z., Shevtsova, V., & van Vaerenbergh, S. (2015). Benchmark values for the Soret, thermodiffusion and molecular diffusion coefficients of the ternary mixture tetralin+isobutylbenzene+n-dodecane with 0.8-0.1-0.1 mass fraction. *European Physical Journal E*, 38(4). <https://doi.org/10.1140/epje/i2015-15030-7>
- Braibanti, M., Artola, P. A., Baaske, P., Bataller, H., Bazile, J. P., Bou-Ali, M. M., Cannell, D. S., Carpineti, M., Cerbino, R., Crococolo, F., Diaz, J., Donev, A., Errarte, A., Ezquerro, J. M., Frutos-Pastor, A., Galand, Q., Galliero, G., Gaponenko, Y., García-Fernández, L., ... Zhang, K. (2019). European Space Agency experiments on thermodiffusion of fluid mixtures in space. In *European Physical Journal E* (Vol. 42, Issue 7). Springer New York LLC. <https://doi.org/10.1140/epje/i2019-11849-0>
- Costesèque, P., Gaillard, S., Gachet, Y., & Jamet, P. (2003). Determination of the apparent negative Soret coefficient of water-10% alcohol solutions by experimental and numerical methods in packed cells. *Philosophical Magazine*, 83(17–18), 2039–2044. <https://doi.org/10.1080/0141861031000107999>
- Costesèque, P., Pollak, T., Platten, J. K., & Marcoux, M. (2004). Transient-state method for coupled evaluation of Soret and Fick coefficients, and related tortuosity factors, using free and porous packed thermodiffusion cells: Application to CuSO<sub>4</sub> aqueous solution (0.25 M). *European Physical Journal E*, 15(3), 249–253. <https://doi.org/10.1140/epje/i2004-10064-6>
- Errarte, A., Martin-Mayor, A., Aginagalde, M., Iloro, I., Gonzalez, E., Falcon-Perez, J. M., Elortza, F., & Bou-Ali, M. M. (2020). Thermophoresis as a technique for separation of nanoparticle species in microfluidic devices. *International Journal of Thermal Sciences*, 156. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2020.106435>
- Galliero, G., Bataller, H., Bazile, J. P., Diaz, J., Crococolo, F., Hoang, H., Vermorel, R., Artola, P. A., Rousseau, B., Vesovic, V., Bou-Ali, M. M., de Zárata, J. M. O., Xu, S., Zhang, K., Montel, F., Verga, A., & Minster, O. (2017). Thermodiffusion in multicomponent n-alkane mixtures. *Npj Microgravity*, 3(1). <https://doi.org/10.1038/s41526-017-0026-8>
- Jang, H. W., & Yang, D. (2022). Determination of effective diffusivity of each component of a binary gas-mixture in porous media saturated with heavy oil. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 184. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122332>
- Königer, A., Meier, B., & Köhler, W. (2009). Measurement of the Soret, diffusion, and thermal diffusion coefficients of three binary organic benchmark mixtures and of ethanol-water mixtures using a beam deflection technique. *Philosophical Magazine*, 89(10), 907–923. <https://doi.org/10.1080/14786430902814029>
- Larrañaga, M., Rees, D. A. S., & Bou-Ali, M. M. (2014). Determination of the molecular diffusion coefficients in ternary mixtures by the sliding symmetric tubes technique. *Journal of Chemical Physics*, 140(5). <https://doi.org/10.1063/1.4864189>
- Mahamoudou, A., Ramousse, J., & le Pierrès, N. (2022). Analysis of a falling film H<sub>2</sub>O/LiBr absorber at local scale based on entropy generation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 198. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123425>
- Mialdun, A., & Shevtsova, V. M. (2008). Development of optical digital interferometry technique for measurement of thermodiffusion coefficients. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(11–12), 3164–3178. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.08.020>
- Naumann, P., Martin, A., Krieger, H., Larrañaga, M., Bou-Ali, M. M., & Wiegand, S. (2012). Development of a thermogravitational microcolumn with an interferometric contactless detection system. *Journal of Physical Chemistry B*, 116(47), 13889–13897. <https://doi.org/10.1021/jp3098473>
- Platten, J. K., Bou-Ali, M. M., Costesèque, P., Dutrieux, J. F., Köhler, W., Leppla, C., Wiegand, S., & Wittko, G. (2003). Benchmark values for the Soret, thermal diffusion and diffusion coefficients of three binary organic liquid mixtures. *Philosophical Magazine*, 83(17–18), 1965–1971. <https://doi.org/10.1080/0141861031000108204>
- Platten, J. K., & Costesèque, P. (2004). The Soret Coefficient in Porous Media. *Journal of Porous Media*, 7(4), 317–329.

- Saghir, M. Z., Hang, C. G., Chachat, M., Yan, Y., Khawaja, M., & Pan, S. (2005). THERMODIFFUSION IN POROUS MEDIA. In *Transport Phenomena in Porous Media: Vol. III* (pp. 227–260). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-044490-1.50013-2>
- Sanjuan, A., Errarte, A., & Bou-Ali, M. M. (2022). Analysis of thermophoresis for separation of polystyrene microparticles in microfluidic devices. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 189, 122690. <https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2022.122690>
- Vyas, D. C. M., Kumar, S., & Srivastava, A. (2016). Porous media based bio-heat transfer analysis on counter-current artery vein tissue phantoms: Applications in photo thermal therapy. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 99, 122–140. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.03.106>

## 7. Eskerrak eta oharrak

Lan honen finantziaketa Gipuzkoako udal probintzialaren 2022-CIEN-000052-01 bekarekin (Hoztikor), Eusko Jaularitzaren ikerketa-taldearen programaren IT1505-22 bekarekin, Espainako gobernuaren GE-MICINN-TED-ekin PID2021-124232OB-I00 bekarekin (Treated) eta CNES-en (Frantziako agentzia espazial nazionala) laguntzarekin burutu da.