

## Medios Granulares

Andres Soto-Bubert<sup>1</sup>, Carlos de las Pozas<sup>1</sup>, Gustavo Navarro<sup>1</sup>, Roberto Acevedo<sup>2</sup>

[1] Facultad de Ingeniería y Tecnología, Universidad San Sebastián, Bellavista 7, Santiago 8420524, Chile

[2] Dirección de Investigación y Desarrollo. Universidad Mayor. San Pio X. Número 2422. Providencia. CP: 7510041 Santiago. Chile.

In nonmetallic mining, there is a number a complex problems to be worked out so as to quantify and make a separation of various fractions of solids and liquids in systems such as brine-salt type. The major issue is rationalize when a mass balance calculations is performed in the solar ponds every time one wishes to quantify the amount of solids and liquids available in situ. When the time comes to harvesting the salt, the situation underlined above becomes very relevant indeed, since it is known that the salt brine causes an undesirable effect upon the mineral law. It does follows, that it is of paramount important to develop a better method to estimate each of the phases, and this certainly will lead to do a better estimate of the brines and salts inventories. In the current work, we have focus our attention upon the quantification of the mass fraction of a saturated brine, which is retained by a solid (NaCl, Halite, Technical Grade), using a correlation mathematical model, developed in this laboratory. At the laboratory scale, the experiment is performed by choosing halite and a saturated brine, by modeling the very floor of a puddle under normal conditions. We have calculated different impregnations values (so called mass fraction) within of a wide range of the salt crystal sizes- from #8 up to #70 Tyler mesh- collecting data from over one hundred experiments. Furthermore, the mathematical testing and adjusting is about the mathematical fact of obtaining a correlation among the four ranges of sizes used, as explained earlier on in the text. We did a very precise and accurate fitting giving rise to a nonlinear correlation. It is worth mentioning that the average error is close to 25% (both forecast and correlation), whereas the maximum and minimum deviation may be in the range of 30% and 1%. The impregnation has values in the range 20,1-55,3 with reference to the weight of the salts, should the sieve of the Halite are smaller than the mesh #8. The results are fully discussed in the forthcoming articles.

### 1.- Introducción

Una poza solar, cuyo objetivo es evaporar agua a partir de salmueras saturadas en iones Na<sup>+</sup> y Cl<sup>-</sup>, precipita sales de Halita de modo de mantener los equilibrios sólido – líquido del sistema. Este es el caso de las pozas solares que operan en salares (Por ejemplo, en el salar de Atacama, Chile) cuyo objetivo es obtener cloruro de potasio, sulfato de potasio y/o salmueras enriquecidas en litio, precipitando sales en forma selectiva por medio de un tren de pozas en serie y paralelo, que precipita fraccionadamente varias sales según sea la ruta de evaporación escogida para la obtención de la sal y/o salmueras de interés [1].

La primera poza solar en general es una poza que tiene como función precipitar mayoritariamente sales de Halita (pueden contener en la práctica un bajo contenido en yeso y cloruro de potasio (Silvita). Las pozas operan en continuo entrando salmueras frescas y con una salida que va agotando el campo Halita de modo de que aparezca el campo de precipitación de Silvita de modo de que esto suceda en otra poza que le sucede, en un tren de pozas. [1,2] En el tiempo, la cantidad de sales de Halita comienza a aumentar en su inventario y por ende la poza antes de ser cosechada (vaciar salmuera de modo de sacar sales para seguir operando posteriormente), presenta dos zonas fácilmente distinguibles, una zona de sales con salmueras ocupando los

intersticios de ellas y la zona de salmuera libre de sal. Evidentemente para poder tener un inventario de salmuera de esta poza que resulta útil para dimensionar los balances de masa de la poza, dado que es la salmuera la materia prima, debe cuantificarse la salmuera que puede estar contenida en la carpeta de sales.

Estas sales en general no se encuentran presurizadas ya que el espejo de agua sobre ellas no supera un metro de profundidad moviéndose entre 0,3 a 0,8 m en la mayoría de los casos. Adicionalmente, las sales tampoco son porosas por lo que se atribuye la impregnación de salmueras exclusivamente a los intersticios que existen entre los granos de sal de diferentes tamaños. En las pozas, la distribución de tamaño es variable, ya que son sistemas abiertos a la atmósfera con fluctuaciones de temperatura apreciables entre 40° de día y los -5°C de noche en sus casos extremos, lo cual genera tamaños de cristal diversos. Simular el problema cuando existe diversidad de tamaños de sólidos es un problema difícil y en general no se encuentra resuelto si hay una amplia posibilidad de tamaños de partículas cristalinas. [1,2]

Representar la fracción másica de salmuera saturada que es retenida por estos sólidos, resulta un reto. El trabajo que se propone realizar tiene dos temas a considerar: una componente experimental, de manera de poder cuantificar la impregnación de la salmuera saturada en la sal de Halita y otra de carácter teórico que dice relación a un ajuste matemático que interprete los experimentos realizados y poder ofrecer una función analítica que relaciones tamices de estas sales y la cantidad de salmuera impregnada en la sal.

La experiencia a escala de laboratorio consiste en Halita y salmuera saturada a partir de la misma sal, la cual es impregnada, simulando el piso de una poza (sal que impregna en una poza la salmuera y que puede tener un metro de altura en el momento de cosecha de la sal), a temperatura ambiente (20°) y una atmósfera de presión. Respecto a la solubilidad del sistema Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, Halita, se sabe que la constante de producto de solubilidad es casi invariante con la temperatura, por lo que las especies en una poza varían en forma insignificante con fluctuaciones térmicas en esta poza. En el caso Silvita y otras sales como Bischofita, sin embargo, la variación es significativa, por lo que los experimentos se realizan en primera aproximación solo en sistema Halita y son válidos en estas pozas. [2-7].

Debe entenderse que es una primera aproximación al problema y ofrece una mejora respecto a la situación que enfrentan en la actualidad las empresas de minería no metálicas (se observan errores de predicción de la impregnación, de hasta 200% en estas faenas mineras). Esta investigación tiene especial interés en industrias de minería no metálica que producen KCl por precipitación fraccionada usando en pozas evaporativas solares.

El trabajo que se propone realizar consiste en un experimento a escala de laboratorio que permita a partir de sales de Halita que satisfacen tamices conocidos, relacionar fracciones másicas de estos tamices con la impregnación de salmuera saturada en la sal, sumergiendo totalmente las sales en dicha salmuera. Dichas muestras salinas, se secan previamente en una mufla (200°C por 30 minutos) de manera de remover cualquier tipo de humedad residual. La Halita no tiene agua de hidratación (es anhídrida) por lo que no se esperan cambios de fase por calentarla. La Halita seca, se deposita en un vaso precipitado y a continuación se sumergen totalmente en salmuera saturada en NaCl hasta su tope, simulando las sales precipitadas de una poza solar. Evidentemente se mide la cantidad de salmuera adicionada, la cual por encontrarse saturada en NaCl no disuelve cristales de Halita. De este modo se tiene como input experimental la fracción másica de tamices de Halita versus su output que es la impregnación de salmuera que corresponde al volumen que existe en los intersticios que hay entre los diversos cristales de Halita.

## 2.- Experimental

El experimento se lleva a cabo a 20°C y atmosfera de presión. Se usa Halita grado analítico, la cual se seca en una mufla modelo JSMF-45T, a 200°C durante 30 minutos asegurando la eliminación de humedad.

Las sales se tamizan a continuación en seco por 4 minutos, usando un tamizador vibratorio con tamices de malla Tyler #8 (1250  $\mu\text{m}$ ), #20 (850  $\mu\text{m}$ ), #40 (425  $\mu\text{m}$ ), #70 (212  $\mu\text{m}$ ), #-70 (<212  $\mu\text{m}$ ). De este modo se definen cuatro rangos de tamices cuya característica es:

- A) X1: Tamiz que atraviesa malla 8 y es retenido por malla #20.
- B) X2: Tamiz que atraviesa malla 20 y es retenido por malla #40.
- C) X3: Tamiz que atraviesa malla 40 y es retenido por malla #70.
- D) X4: Tamiz que atraviesa malla 70.

Se usa una base de 2 kilogramos de sal Halita que es preparada como la suma constituida por sales Halita clasificadas de X1 a X4, mezcla que luego se rolea, de modo de asegurar homogeneidad en la distribución de tamaños de la muestra. De este modo X1 a X4 representa una fracción másica de la sal que satisface los rangos de tamices descritos anteriormente.

Sea  $y_i$  una cantidad de sal de Halita en el rango 0-2000 gramos del tamiz "X<sub>i</sub>", con  $i=1,4$ , se tiene luego que:

$$\frac{y_i}{\sum_{i=1}^4 y_i} = X_i$$

$$\sum_{i=1}^4 X_i = 1 \text{ o bien expresado como porcentaje } \sum_{i=1}^4 x_i * 100 = 100\% \text{ donde } X_i * 100 = x_i$$

La sal una vez preparada y roleada, de modo que satisface las condiciones anteriores se llena adiciona en un vaso precipitado y luego se rellena con salmuera saturada en NaCl de modo de que se llene hasta sumergir todos los cristales de Halita que se encuentran en el interior del vaso.

Se mide los gramos de salmuera adicionada por 2000 gramos de sal NaCl y se mide con una unidad de concentración la impregnación de salmuera en las sales (Im), luego:

$$\% Im = \frac{\text{gramos de salmuera adicionada}}{2000 \text{ gramos de sal Halita}} * 100$$

Los gramos de sal adicionada se miden en una balanza analítica al igual que la cantidad de salmuera adicionada.

## 3.-Resultados

Con los datos anteriores se confecciona una tabla de datos con 111 experimentos donde se varía las fracciones X1-X4, expresadas como porcentaje, reportando la impregnación de salmuera porcentual en cada caso "Im". Los resultados de estos experimentos se presentan en la tabla 1:

Tabla 1: Porcentajes xi v/s Impregnación (Im)

| Número de orden | x1 (%) | x2 (%) | x3 (%) | x4 (%) | Impregnación Im (%)<br>[ $\frac{g \text{ salmuera} * 100}{2000 g \text{ sal Halita}}$ ] | Im (x1,x2,x3,x4) | Variación (Im exp - Im teo) |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|---|------------------|-----------------------------|
| 1               | 56,1   | 30,6   | 8,7    | 4,6    | 31,70   | 31,03            | 0,67                        |
| 2               | 38,8   | 46,5   | 12,2   | 2,5    | 29,21   | 33,77            | -4,56                       |
| 3               | 43,8   | 41,4   | 11,8   | 3,0    | 31,54   | 33,10            | -1,56                       |
| 4               | 47,2   | 43,0   | 8,1    | 1,6    | 31,87   | 34,44            | -2,57                       |
| 5               | 4,8    | 37,3   | 39,2   | 18,7   | 28,17   | 25,21            | 2,96                        |
| 6               | 13,8   | 55,0   | 25,1   | 6,1    | 31,78   | 30,62            | 1,16                        |
| 7               | 40,1   | 43,7   | 13,2   | 3,0    | 28,79   | 33,30            | -4,51                       |
| 8               | 18,5   | 40,8   | 30,3   | 10,4   | 25,63   | 27,97            | -2,34                       |
| 9               | 19,1   | 47,8   | 23,2   | 9,9    | 34,44   | 28,02            | 6,42                        |
| 10              | 18,0   | 60,7   | 17,5   | 3,8    | 27,81   | 32,32            | -4,51                       |
| 11              | 29,8   | 47,6   | 18,5   | 4,1    | 37,22   | 32,48            | 4,74                        |
| 12              | 34,0   | 24,4   | 22,2   | 19,4   | 22,16   | 23,75            | -1,59                       |
| 13              | 22,9   | 49,8   | 22,8   | 4,5    | 28,23   | 32,30            | -4,07                       |
| 14              | 34,1   | 47,8   | 14,9   | 3,2    | 32,79   | 33,19            | -0,40                       |
| 15              | 33,7   | 37,2   | 22,6   | 6,5    | 25,99   | 30,52            | -4,53                       |
| 16              | 33,8   | 48,7   | 15,0   | 2,5    | 28,80   | 34,22            | -5,42                       |
| 17              | 31,4   | 49,7   | 16,5   | 2,4    | 32,43   | 34,59            | -2,16                       |
| 18              | 34,9   | 22,2   | 15,6   | 27,3   | 22,64   | 21,94            | 0,70                        |
| 19              | 42,1   | 31,9   | 17,2   | 8,8    | 24,37   | 28,51            | -4,14                       |
| 20              | 52,1   | 22,7   | 15,3   | 9,9    | 23,96   | 27,83            | -3,87                       |
| 21              | 69,8   | 17,3   | 8,3    | 4,6    | 28,39   | 31,39            | -3,00                       |
| 22              | 4,5    | 56,0   | 25,6   | 13,9   | 31,83   | 26,47            | 5,36                        |
| 23              | 28,4   | 50,1   | 14,4   | 7,1    | 36,84   | 29,29            | 7,55                        |
| 24              | 8,2    | 66,1   | 19,9   | 5,8    | 32,49   | 30,26            | 2,23                        |
| 25              | 27,9   | 54,2   | 13,9   | 4,0    | 33,37   | 31,89            | 1,48                        |
| 26              | 12,1   | 68,0   | 14,1   | 5,8    | 35,18   | 29,93            | 5,25                        |
| 27              | 66,0   | 25,7   | 6,0    | 2,3    | 35,73   | 33,18            | 2,55                        |
| 28              | 36,0   | 47,1   | 10,7   | 6,2    | 34,40   | 29,60            | 4,80                        |
| 29              | 39,9   | 46,9   | 9,1    | 4,1    | 36,71   | 31,15            | 5,56                        |
| 30              | 31,1   | 47,5   | 16,0   | 5,4    | 26,46   | 30,87            | -4,41                       |
| 31              | 39,1   | 45,1   | 11,8   | 4,0    | 25,07   | 31,79            | -6,72                       |
| 32              | 40,9   | 47,1   | 10,0   | 2,0    | 28,83   | 34,15            | -5,32                       |
| 33              | 45,7   | 42,5   | 9,5    | 2,3    | 26,27   | 33,59            | -7,32                       |
| 34              | 36,3   | 45,3   | 12,7   | 5,7    | 35,72   | 30,28            | 5,44                        |
| 35              | 46,8   | 39,7   | 10,0   | 3,5    | 33,93   | 32,16            | 1,77                        |
| 36              | 30,7   | 50,1   | 14,7   | 4,5    | 27,66   | 31,56            | -3,90                       |
| 37              | 47,3   | 38,2   | 10,9   | 3,6    | 36,16   | 32,25            | 3,91                        |
| 38              | 31,8   | 43,4   | 13,7   | 11,1   | 34,89   | 26,94            | 7,95                        |
| 39              | 65,4   | 25,3   | 6,7    | 2,6    | 35,89   | 32,99            | 2,90                        |
| 40              | 49,4   | 35,8   | 12,1   | 2,7    | 33,91   | 33,72            | 0,19                        |
| 41              | 59,7   | 29,0   | 8,5    | 2,8    | 41,30   | 33,02            | 8,28                        |
| 42              | 30,5   | 48,6   | 16,4   | 4,5    | 34,94   | 31,79            | 3,15                        |

|    |       |      |      |      |       |       |       |
|----|-------|------|------|------|-------|-------|-------|
| 43 | 42,4  | 43,8 | 10,8 | 3,0  | 27,92 | 32,84 | -4,92 |
| 44 | 50,9  | 36,8 | 9,7  | 2,6  | 28,77 | 33,34 | -4,57 |
| 45 | 39,6  | 41,6 | 14,8 | 4,0  | 27,63 | 32,31 | -4,68 |
| 46 | 26,7  | 52,9 | 14,9 | 5,5  | 37,70 | 30,56 | 7,14  |
| 47 | 9,8   | 66,6 | 20,1 | 3,5  | 36,10 | 32,48 | 3,62  |
| 48 | 31,9  | 49,2 | 16,1 | 2,8  | 35,62 | 33,90 | 1,72  |
| 49 | 42,6  | 43,5 | 11,4 | 2,5  | 34,27 | 33,69 | 0,58  |
| 50 | 32,5  | 47,8 | 15,5 | 4,2  | 24,83 | 32,03 | -7,20 |
| 51 | 46,4  | 40,7 | 10,0 | 2,9  | 31,05 | 32,89 | -1,84 |
| 52 | 32,5  | 46,9 | 15,8 | 4,8  | 31,13 | 31,45 | -0,32 |
| 53 | 50,0  | 37,9 | 9,3  | 2,8  | 33,67 | 32,94 | 0,73  |
| 54 | 45,6  | 34,3 | 15,4 | 4,7  | 26,71 | 31,73 | -5,02 |
| 55 | 42,5  | 37,0 | 15,1 | 5,4  | 26,67 | 30,96 | -4,29 |
| 56 | 62,0  | 26,4 | 9,0  | 2,6  | 28,53 | 33,48 | -4,95 |
| 57 | 53,2  | 32,8 | 11,5 | 2,5  | 30,71 | 33,98 | -3,27 |
| 58 | 52,0  | 35,1 | 10,1 | 2,8  | 40,22 | 33,20 | 7,02  |
| 59 | 36,6  | 43,1 | 18,3 | 2,0  | 42,76 | 35,80 | 6,96  |
| 60 | 54,8  | 34,7 | 10,2 | 0,3  | 47,11 | 39,74 | 7,37  |
| 61 | 59,4  | 31,5 | 9,0  | 0,1  | 48,50 | 41,26 | 7,24  |
| 62 | 0,0   | 46,4 | 43,4 | 10,1 | 25,10 | 30,79 | -5,69 |
| 63 | 0,2   | 44,3 | 48,5 | 7,0  | 27,93 | 29,44 | -1,51 |
| 64 | 0,1   | 48,4 | 45,6 | 5,9  | 26,78 | 29,73 | -2,95 |
| 65 | 0,9   | 48,3 | 43,3 | 7,5  | 28,13 | 29,25 | -1,12 |
| 66 | 0,0   | 0,1  | 31,4 | 68,5 | 29,33 | 35,73 | -6,40 |
| 67 | 0,0   | 0,9  | 44,3 | 54,8 | 29,22 | 34,59 | -5,37 |
| 68 | 0,1   | 1,6  | 35,0 | 63,3 | 25,46 | 31,13 | -5,67 |
| 69 | 0,0   | 2,2  | 26,2 | 71,6 | 33,56 | 34,78 | -1,22 |
| 70 | 0,0   | 40,0 | 0,0  | 60,0 | 30,35 | 31,82 | -1,47 |
| 71 | 0,0   | 70,0 | 0,0  | 30,0 | 29,44 | 30,38 | -0,94 |
| 72 | 50,0  | 0,0  | 10,0 | 40,0 | 24,07 | 26,99 | -2,92 |
| 73 | 40,0  | 0,0  | 40,0 | 20,0 | 34,98 | 27,31 | 7,67  |
| 74 | 50,0  | 0,0  | 0,0  | 50,0 | 28,73 | 28,30 | 0,43  |
| 75 | 0,0   | 50,0 | 0,0  | 50,0 | 28,86 | 31,15 | -2,29 |
| 76 | 0,0   | 0,0  | 50,0 | 50,0 | 42,24 | 35,29 | 6,95  |
| 77 | 0,0   | 50,0 | 50,0 | 0,0  | 32,92 | 33,09 | -0,17 |
| 78 | 0,0   | 0,0  | 30,0 | 70,0 | 35,83 | 36,13 | -0,30 |
| 79 | 70,0  | 0,0  | 10,0 | 20,0 | 23,25 | 28,21 | -4,96 |
| 80 | 60,0  | 5,0  | 30,0 | 5,0  | 31,27 | 30,81 | 0,46  |
| 81 | 30,0  | 40,0 | 0,0  | 30,0 | 32,65 | 32,87 | -0,22 |
| 82 | 20,0  | 40,0 | 0,0  | 40,0 | 33,24 | 33,74 | -0,50 |
| 83 | 40,0  | 0,0  | 0,0  | 60,0 | 31,12 | 28,48 | 2,64  |
| 84 | 5,0   | 0,0  | 10,0 | 85,0 | 34,36 | 32,88 | 1,48  |
| 85 | 0,0   | 15,0 | 30,0 | 55,0 | 34,05 | 32,15 | 1,90  |
| 86 | 0,0   | 0,0  | 50,0 | 50,0 | 40,00 | 35,29 | 4,71  |
| 87 | 0,0   | 50,0 | 25,0 | 25,0 | 35,93 | 29,92 | 6,01  |
| 88 | 100,0 | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 40,14 | 38,96 | 1,18  |
| 89 | 100,0 | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 33,24 | 38,96 | -5,72 |
| 90 | 100,0 | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 42,06 | 38,96 | 3,10  |
| 91 | 100,0 | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 43,41 | 38,96 | 4,45  |

|     |       |       |       |       |       |       |       |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 92  | 100,0 | 0,0   | 0,0   | 0,0   | 39,04 | 38,96 | 0,08  |
| 93  | 100,0 | 0,0   | 0,0   | 0,0   | 37,90 | 38,96 | -1,06 |
| 94  | 0,0   | 100,0 | 0,0   | 0,0   | 28,09 | 32,85 | -4,76 |
| 95  | 0,0   | 100,0 | 0,0   | 0,0   | 40,35 | 32,85 | 7,50  |
| 96  | 0,0   | 100,0 | 0,0   | 0,0   | 28,87 | 32,85 | -3,98 |
| 97  | 0,0   | 100,0 | 0,0   | 0,0   | 34,42 | 32,85 | 1,57  |
| 98  | 0,0   | 100,0 | 0,0   | 0,0   | 29,75 | 32,85 | -3,10 |
| 99  | 0,0   | 100,0 | 0,0   | 0,0   | 33,02 | 32,85 | 0,17  |
| 100 | 0,0   | 0,0   | 100,0 | 0,0   | 41,04 | 35,09 | 5,95  |
| 101 | 0,0   | 0,0   | 100,0 | 0,0   | 27,20 | 35,09 | -7,89 |
| 102 | 0,0   | 0,0   | 100,0 | 0,0   | 36,75 | 35,09 | 1,66  |
| 103 | 0,0   | 0,0   | 0,0   | 100,0 | 41,73 | 38,61 | 3,12  |
| 104 | 0,0   | 0,0   | 0,0   | 100,0 | 37,34 | 38,61 | -1,27 |
| 105 | 0,0   | 0,0   | 0,0   | 100,0 | 30,79 | 38,61 | -7,82 |
| 106 | 0,0   | 0,0   | 0,0   | 100,0 | 40,10 | 38,61 | 1,49  |
| 107 | 0,0   | 0,0   | 0,0   | 100,0 | 43,03 | 38,61 | 4,42  |
| 108 | 0,0   | 0,0   | 0,0   | 100,0 | 38,50 | 38,61 | -0,11 |
| 109 | 0,0   | 0,0   | 0,0   | 100,0 | 34,58 | 38,61 | -4,03 |
| 110 | 0,0   | 0,0   | 0,0   | 100,0 | 42,72 | 38,61 | 4,11  |
| 111 | 0,0   | 0,0   | 0,0   | 100,0 | 41,64 | 38,61 | 3,03  |

Si se observa la tabla 1, los datos tabulados desde el número de orden 88-111 no solo entregan información de la impregnación, sino que además permiten tener una medida del error experimental el cual se relaciona con el hecho de que la superficie de salmuera adicionada tiene un error asociada con que la superficie de los cristales generada en el vaso es rugosa y evidentemente genera un error no despreciable. Adicionalmente, los tamices al ubicarse en rangos dentro de los cuales existen distribuciones de tamaño es evidente que puede haber variaciones de tamaño en esas distribuciones lo que asegura que los valores de impregnación tengan rangos de validez y no exista un valor único, esto se aprecia en los datos de la tabla 1 entre los valores 88-93 (error relativo de 16%), 94-99 (error relativo de 25%), 100-102 (error relativo de 22%), 106-111 (error relativo de 21%). Se estima que el error relativo experimental máximo que se comete es del orden de 25%.

Se genera a partir de los datos de la tabla 1 una correlación matemática que calcula la impregnación  $Im$  en función de  $x_1$ - $x_4$ :

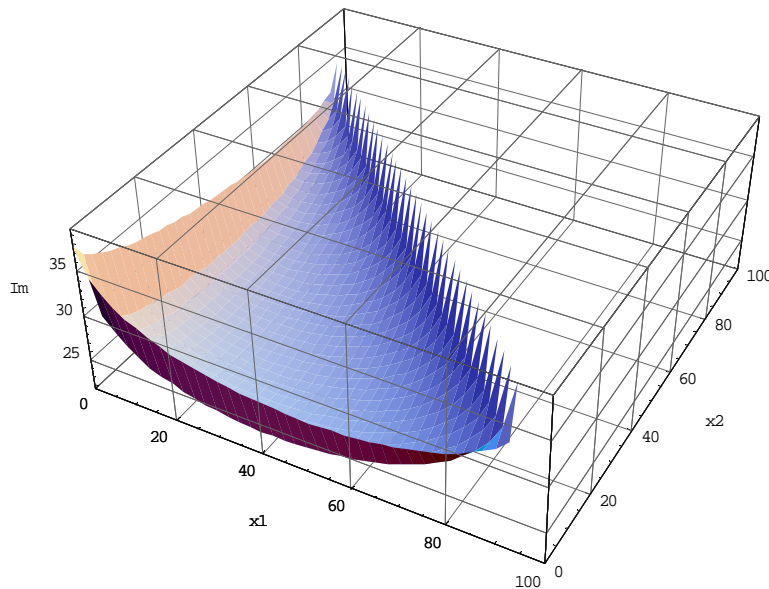
$$\begin{aligned}
 Im[x_1, x_2, x_3, x_4] = & 100 - 0,610408 * x_1 - 0,675068 * x_2 - 0,251371 * \sqrt{x_1 * x_2} - \\
 & 0,649079 * x_3 - 0,111020 * \sqrt{x_1 * x_3} - 0,017558 * \sqrt{x_2 * x_3} + 0,958463 * \sqrt[3]{x_1 * x_2 * x_3} \\
 & - 0,613871 * x_4 - 0,209684 * \sqrt{x_1 * x_4} - 0,091596 * \sqrt{x_2 * x_4} + 0,443127 * \sqrt[3]{x_1 * x_2 * x_4} \\
 & - 0,031201 * \sqrt{x_3 * x_4} + 0,038505 * \sqrt[3]{x_1 * x_3 * x_4} - 0,009413 * \sqrt[3]{x_2 * x_3 * x_4} \\
 & - 1,280118 * \sqrt[4]{x_1 * x_2 * x_3 * x_4}
 \end{aligned}$$

La función anterior tiene 15 parámetros ajustados y considera un valor 100 en el caso que no existan sales, o sea  $x_1=x_2=x_3=x_4=0$  (un valor hipotético, que en la práctica no existe). Si se observa la expresión todas las variables, sean lineales o no tienen igual peso, por lo que puede observarse el "peso" de cada término. En la tabla 1 se proyecta la columna con el resultado  $Im[x_1, x_2, x_3, x_4]$  y la variación entre el resultado teórico y

experimental, punto a punto. Se observa un error máximo punto a punto de 30%, siendo la varianza 4,3 entre Impregnación teórica y experimental. El máximo error de un punto tabulado es de 8,28 (dato 41) en impregnación que representa en la medida un error de 24,8% respecto a los datos teóricos y experimentales.

La función anterior permite generar curvas de nivel para la impregnación, generando gráficos 3D (ver figura 1). El sistema requiere ingresar  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ , ya que  $x_4$  es una variable que depende de las tres anteriores ( $x_4 = 100 - (x_1 + x_2 + x_3)$ )

Figura 1: Ejemplo de curva de nivel  $x_3 = 5\%$ :



Del mismo modo es posible tabular todas las posibilidades de la función de manera de registrar el valor máximo y mínimo. La función siempre tiene sentido físico y sus valores son reales si se usan valores de  $x_1$ - $x_4$  que satisfacen las restricciones del problema.

Se puede intentar buscar el mínimo y máximo teórico de impregnación y se observa los resultados siguientes:

Se observa un mínimo en  $(x_1=24, x_2=11, x_3=20, x_4=45)$  con impregnación de 20.12 %

y un máximo en  $(x_1=30, x_2=29, x_3=41, x_4= 0)$  , con impregnación de 55.24 %

El resultado relativo al máximo y mínimo de impregnación, es esperable dado que la fracción de finos ( $x_4$ ) juega un rol importante en el llenado de intersticios entre cristales de tamaños mayores diferenciando una gran concentración de partículas finas en el caso de mínima impregnación ( $x_4=45\%$ ) y una nula concentración de partículas

#### 4.- Conclusiones.

Se genera una función analítica, no lineal, con errores relativos máximos de predicción de 30% el cual es razonable si se considera que el error experimental relativo máximo es de 25%. El ajuste es de 16 parámetros, a partir de 111 puntos experimentales. La función permite una rápida estimación de impregnación de la salmuera saturada en la sal de Halita, a partir de tamices de tamaños y su distribución másica porcentual (en base seca). El ajuste permite acotar los errores de impregnación y es un aporte para realizar balances de masa en pozas de evaporación solar que presentan sales de Halita en su ruta de evaporación.

#### 5.- Discusiones.

Evidentemente considerando mayor cantidad de mallas de tamices, el error experimental se reduce, pero la cantidad de experimentos crece en forma apreciable. Esto también podría mejorar el ajuste de la correlación, pero se asume un error moderado el que se comete.

#### 6.- Referencias

- [1] "Formation and Chemical evolution of magnesium chloride brines by evaporate dissolution process", R.Krupp, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol 69, N° 17, 4283-4299, 2005.
- [2] *Handbook of lithium and natural calcium chloride, their deposits, processing, uses and properties*, D.E. Garret, Elsevier, part I, 2004 , ISBN: 978-0-12-276152-2.
- [3] "General prediction of median cristal sizes", A. Mersmann et al., *Sep. Technol.*, vol2, Elsevier, , abril, pag 85-97, 1992
- [4] "Crystallization and precipitation", A. Mersmann, *Chemical Engininnering and Processing* 38, Elsevier, 345-353, 1999
- [5] "Computer simulation of the performance of a solar pond in the Southern part of Iran", A. Aliakbar and G. Ahmadi, *Solar Energy*, vol 24, Pergamon press, 143-151, 1980.
- [6] "Solar Evaporation of Salt Brines", M.R. Bloch et al., *Industrial Engineering Chemistry*, vol 43,7, 1544-1553, 1951.
- [7] "Parameters Influencing the mean particle size of a Crystalline product", A. Mersmann et al., *Chem. Eng. Technol.*,12, 414-419, 1989.
- [8] "Crystallization of potash", D.E.Garret, *Chem. Eng. Progress*, vol 59, 10, 59-64, 1963.