**AGROCENTRO**

**Modelos Físicos-Matemáticos de Difusión de agua en granos**

***Physical-Mathematical models of water Diffusion in grains***

**Williams Morales González1, Jesús E. Hernández Ruiz2, Bárbara S. Martínez Chinea3**

1- Estudiante 4to Año Licenciatura en Física y Alumno Ayudante Laboratorio de Física Molecular y Termodinámica del Dpto. de Física. Facultad de Matemática, Física y Computación. Universidad Central ‘’Marta Abreu’’ de Las Villas, Carretera a Camajuaní Km 5½ Santa Clara 54 830. Villa Clara. Cuba. E-mail: wmorales@uclv.cu, wilianmorales@nauta.cu

2- Profesor Titular del Dpto. de Física. Facultad de Matemática, Física y Computación. Universidad Central ‘’Marta Abreu’’ de Las Villas, Carretera a Camajuaní Km 5½ Santa Clara 54 830. Villa Clara. Cuba. E-mail: jesusehr@uclv.edu.cu , jesusehdezruiz@gmail.com

3- Empresa de Silos (EMSIL). UEB Villa Clara, Cuba.

**Resumen:** En el presente artículo se realiza un estudio teórico de la difusión de humedad en granos almacenados por tiempos prolongados en Silos Metálicos Refrigerados (SMR). Se describen algunos de los modelos físicos-matemáticos reportados en la literatura especializada en el tema. Se presentan y discuten, la formulación y soluciones de los modelos de difusión de humedad en granos de geometría esférica. También se presenta y describe el modelo empírico de Peleg. Finalmente, se presentan las conclusiones y se describen brevemente los estudios que en el futuro serán realizados, para obtener los regímenes adecuados de operación de los sistemas refrigerados que contemple el conocimiento del comportamiento de cada tipo de grano en función del contenido de humedad y de la temperatura.

***Abstract:*** *In this paper the theorical study of moisture diffusion in grains, which remains for long time in Metallic Refrigerate Silos (MRS) is described. Some of the physical-mathematical models reported in the specialized literature in this thematic are described. The formulation and solutions of the moisture diffusion models in spherical geometry grains are presented and discussed. The empirical model of Peleg is also presented and described.* *Finally, the conclusions are presented and the studies that will be carried out in the future are briefly described, to obtain the adequate operating regimes of the refrigerated systems that includes knowledge of the behavior of each type of grain according to the moisture content and the temperature.*

**Palabras Clave:** Difusión; Humedad; Granos; Silos Metálicos Refrigerados.

***Keywords:*** *Diffusion; Moisture; Grains; Metallic Refrigerate Silos.*

**1. Introducción**

Los granos son materiales higroscópicos, es decir, poseen la capacidad de absorber y desorber la humedad del medio ambiente donde se encuentran (Muthokumarappan y Gunasekaran, 2008). Los granos situados en ambientes con niveles de humedad superiores a la que ellos mismos contienen, inicialmente se recubren de agua, la que posteriormente se difunde en su estructura (Hsu, 1984). Esto adquiere una connotación especial en las condiciones de climas tropicales y húmedos como el cubano pues, la exposición de los granos durante la cosecha, secado, transportación y almacenamiento en estas atmósferas altamente humectantes influye de forma negativa en su calidad, degradando sus propiedades generales y muy particularmente las nutritivas, mecánicas, físico – químicas y, en el caso de las semillas, su capacidad de germinación (Chung y Converse, 1971; Seifi y Alimardani, 2010).

Los altos contenidos de humedad junto a favorables condiciones de temperaturas favorecen el desarrollo de bacterias, hongos e insectos (Navarro et al., 2002). A esto hay que añadir que los granos son entes vivos, y su actividad metabólica, junto a la de los insectos y hongos, genera calor, agua y CO2, (Reuss et al., 1994; Paucar Nemacho, 2017) lo cual agrava esta situación.

El valor económico, alimenticio, agrícola e industrial de los granos y semillas dependen de su calidad; y ésta, como se ha descrito antes está asociada con el nivel de humedad y la temperatura de los granos. Por ello, el cuidado y control que se requiere sobre estas variables en las diferentes etapas que involucran el manejo y acarreo de los granos. Generalmente los granos se cosechan con altos contenido de humedad y para almacenarlos de manera segura, sin que se desarrollen hogos o experimenten descomposición, se requiere secarlos, llevándolos hasta un contenido de humedad adecuado (Sadaka y Bautista, 2014). Sin embargo, por tratarse de la etapa más prolongada, es durante el almacenamiento el momento en que se deben extremar las medidas de control del nivel de humedad y temperatura de los granos. En este contexto, Converse et al. (1971) y Khankari et al. (1994) explican que son el contenido de humedad y la temperatura los factores críticos en el mantenimiento de la calidad de los granos durante su almacenamiento.

La durabilidad de los granos está básicamente determinada por su capacidad para resistir la penetración de la humedad y otros agentes agresivos. La durabilidad es, por tanto, críticamente determinada por la velocidad con la cual la humedad se infiltra y se mueve a través de la estructura del grano. En este sentido, Muthokumarappan y Gunasekaran (2008) describen cómo la absorción y desorción de humedad por las granos puede conducir al desarrollo de tensiones internas, y agregan que tanto las tensiones internas como externas son la causa de las fisuras del núcleo de los granos. Asimismo, Pérez et al. (2014) explican que la humectación del grano produce grietas y fisuras, lo cual aumenta la tasa de difusión de humedad. Luego, la penetración de humedad en diversos tipos de granos puede proveer un mecanismo y camino para la penetración de mayor cantidad de agua y al mismo tiempo de agentes agresivos y dañinos a los granos.

Al mismo tiempo, como se explicó antes, la humectación de los granos está estrechamente relacionada con la temperatura. En relación con este particular, destacan los trabajos de Pixton y Warburton (1971), quienes estudiaron la relación funcional de la razón del contenido de humedad/ humedad relativa vs. la temperatura en diferentes tipos de granos, tales como trigo, maíz y frijoles; y ofrecieron los nomogramas correspondientes, de Vertucci et al. (1994) que postulan y verifican la hipótesis de que el contenido óptimo de humedad en granos de chicharos o guisantes se puede incrementar sin causar daños a los granos cuando disminuye la temperatura de almacenamiento, de Seyda et al. (2000) quienes investigaron el efecto del tiempo de almacenamiento, el contenido de humedad y la temperatura de almacenamiento sobre la viabilidad de semillas de soya, y demostraron que la interacción entre estos tres factores es estadísticamente significativa y finalmente de Sawant et al. (2012) que investigaron el efecto conjugado de la temperatura, la humedad relativa y el contenido de humedad sobre el índice de germinación de semillas de trigo almacenadas en diferentes tipos de silos.

Por otra parte, el problema del transporte de humedad en granos ha recibido gran atención en el pasado (Pixton and Griffiths, 1971; Thorpe, 1981; Thorpe, 1982; Deshpande et al., 1994) y lo recibe aun en el presente (Montanuci et al. 2013; Pérez et al., 2014). En este sentido, la literatura especializada reporta ampliamente el estudio de la hidratación y de la difusión de humedad en diferentes tipos de granos, y modela, analítica y numéricamente este proceso, empleando mayoritariamente modelos Fickianos de difusión, generalmente en las estructuras esféricas y cilíndricas de diferentes tipos de granos (Hsu, 1984; Lu and Siebenmorgen, 1992; Casada, 2002). También se reporta el estudio del transporte global de la humedad en silos y otras estructuras de almacenamiento de granos (Smith y Sokhansanj, 1990; Thorpe et al., 1991; Thorpe et al., 1991A; Xanthopoulos and Woods, 2003; Jian et al., 2009).

A pesar de que en los últimos tiempos se han desarrollado y aplicado diferentes técnicas que permiten medir de manera rápida y con incertidumbres adecuadas el contenido de humedad de los granos, así como seguir la evolución de la humectación de los granos y el registro de los datos experimentales para el ajuste de los diferentes modelos de difusión de humedad, entre ellas la medición del contenido de humedad a través de métodos eléctricos, que se fundamentan en la correlación entre las propiedades dieléctricas de los granos y el contenido de humedad de éstos (Nelson, 1981), la medición de la humedad empleando técnicas de microondas y ondas de alta frecuencia (Nelson y Kraszewski, 1990; Nelson et al. 1998; Nelson et al., 2001), a partir de la alta correlación que existe, a una determinada frecuencia, entre el contenido de humedad de los granos y sus propiedades dieléctricas, métodos espectroscópicos con empleo de resonancia magnética nuclear (Stapley et al., 1998) y medición del contenido de humedad de los granos usando sensores integrados para medición de la humedad relativa y la temperatura (Uddin et al., 2005) entre otras técnicas de las más novedosas y sofisticadas; continúa siendo el ensayo clásico de humectación, con el empleo de técnicas gravimétricas, el más usado pues, a pesar de resultar tedioso, el equipamiento requerido para su realización es relativamente barato, de simple operación y la información que se puede obtener sobre todo el proceso de humectación de los granos es altamente confiable, la que además, con el empleo de modelos clásicos de difusión permite estimar con alta precisión y exactitud los parámetros cinéticos y termodinámicos del proceso, todos éstos de gran valor en el estudio del comportamiento de la humectación de los granos y su dependencia con la temperatura.

Al mismo tiempo, la solución o atenuación de los problemas que se presentan durante el almacenamiento de los granos por efectos combinados de la humead y la temperatura, pudiera efectuarse modificando la atmósfera interior del lugar donde se almacenan. Esto puede lograrse de varias formas: a) Mediante la disminución del contenido de oxígeno y el enriquecimiento de la atmósfera de conservación de los granos con nitrógeno usando para ello sistemas PSA (*Pressuring System Adsorption*) con el fin de restringir la disponibilidad del oxígeno del aire y así poder disminuir los procesos de respiración de los hongos e insectos, b) Disminuyendo el contenido de humedad de la atmósfera de conservación con el empleo dehumificadores o sustancias absorbentes reciclables, tales como zeolitas naturales o sintéticas, carbón activado, silica-geles y otras, c) Disminuyendo la temperatura de los granos almacenados por medio de la refrigeración y d) Mediante la combinación de dos o más de estos procederes entre otros métodos. De todos estos procederes, el más extendido es la que se basa en el empleo de la refrigeración.

En Cuba en la últimas décadas se han realizado ingentes esfuerzos para la adquisición, instalación y operación de Silos Metálicos Refrigerados (SMR) para el almacenamiento y conservación de granos tales como chicharos, maíz y frijoles entre otros. Sin embargo, la refrigeración requiere al mismo tiempo de un riguroso control de la humedad y lo que es más importante, del conocimiento de la dependencia temperatura vs. humedad para cada tipo de grano almacenado, pues de lo contrario se pueden ocasionar gastos excesivos de energía por concepto de sobre enfriamiento, o lo que es más peligroso aun, buscando ahorros de energía, no lograr los niveles adecuados de temperatura en función del contenido de humedad para cada tipo de grano, y producirse el consecuente deterioro de la propiedades de los granos almacenados. De aquí la necesidad de establecer regímenes adecuados de operación de los sistemas refrigerados que contemplen el conocimiento del comportamiento de la temperatura en función del contenido de humedad para cada tipo de grano.

De este modo, el presente trabajo tiene el propósito de presentar el marco teórico asociado a los modelos físicos-matemáticos, reportados en la bibliografía especializada, que permitan describir la cinética del transporte de humedad en los granos que se almacenan durante tiempos prolongados con el fin de determinar los tiempos óptimos de almacenamiento de diferentes tipos de granos y los regímenes adecuados de operación de los SMR, con consumos mínimos de energía y niveles adecuados de temperatura en función del contenido de humedad, para evitar la aparición de gérmenes y consecuentemente garantizar que no se degraden las propiedades de los granos almacenados más allá de los límites permisibles.

**2. Modelos físicos matemáticos para la difusión de agua en granos**

En la literatura especializada la cinética de humectación de los granos ha sido ampliamente tratada. Diferentes autores (Pixton y Griffiths, 1971; Thorpe, 1980: Hsu, 1984, Aguerre et al., 1985; Bello et al., 2010; Wahengbam et al., 2019) han desarrollado sus estudios modelando el proceso de trasferencia de humedad o de agua en la estructura de los granos empleando la teoría clásica de la difusión. Estos estudios generalmente se han sido realizados en granos cuyas geometrías puede ser asumidas como esféricas o cilíndricas.

Otros estudios del proceso de humectación y de remojo de los granos se basan en modelos empíricamente establecidos. Dentro de estos modelos, es tal vez el modelo desarrollado originalmente por Peleg (1988) el más ampliamente usado. De este modo, la tendencia general durante el estudio de la humectación de diferentes tipos de granos es modelar el proceso de trasferencia de agua sea, vapor de agua o agua líquida, empleando la teoría clásica de la difusión o usando modelos empíricos. A continuación se describen brevemente ambos tipos de modelos.

**2.1 Modelos basados en la teoría clásica de la difusión**

**2.1.1 Ideas generales sobre la teoría clásica de la difusión**

Las leyes básicas de la teoría clásica de la difusión fueron enunciada por Fick en 1855 (Fick, 1855). En esta teoría se postula que en un medio isótropo el ritmo de transferencia de la sustancia difusora por unidad de área de la sección transversal en la dirección perpendicular es proporcional al gradiente de concentración medido normal a la sección, i.e.:

donde es el ritmo de transferencia por unidad de área de la sección, es la concentración de la sustancia difusora, la coordenada espacial normal a la sección y , es la constante de proporcionalidad, denominada coeficiente de difusión El signo negativo en la ecuación se debe a que la difusión ocurre en el sentido del decrecimiento de la concentración. La ecuación (1) es la formulación matemática de la primera ley de Fick.

Combinando adecuadamente la primera ley de Fick (ecuación 1) y la ecuación de continuidad, o sea, la expresión matemática de la ley de conservación de la masa en sistemas donde no están ocurriendo reacciones químicas y no existen fuentes ni sumideros, se obtiene la ecuación diferencial de la difusión o segunda ley de Fick. En el caso particular de un medio isotrópico en el que el coeficiente de difusión no depende de la concentración de la sustancia difusora y es constante, esta ecuación en coordenadas cartesianas se escribe de la siguiente forma:

En coordenadas esféricas la ecuación de la segunda ley de Fick, si se considera que la difusión de la sustancia ocurre en la dirección radial y además, se asume que el coeficiente de difusión es constante, se escribe (Crank, 1975):

donde es la distancia radial.

La ecuación (3) es como sus antecesoras, las ecuaciones (1) y (2), una ecuación fenomenológica y debe ser apropiada para describir los procesos de difusión en estructuras esféricas con independencia del tipo de material y de la sustancia difusora. De este modo, la ecuación (3) pudiera ser empleada para modelar la trasferencia de humedad en granos de geometría esférica.

**2.1.2 Modelación de la difusión de humedad en granos de geometría esférica**

La teoría clásica de la difusión se ha aplicado de diferentes maneras al estudio de la humectación de los granos y semillas (Pixton y Griffiths, 1971; Thorpe, 1980; Hsu, 1983; Hsu, 1984; Aguerre et al., 1985; Engels et al., 1986; Deshpande, 1994; Kang y Delviche, 1999; Bello et al., 2010; Wahengbam et al., 2019). En este contexto, destaca el estudio realizado por Hsu (1984) quien modeló el proceso de humectación de los granos esféricos considerando que este proceso consta de dos periodos, a saber, un periodo de absorción de agua seguido por el periodo de equilibrio. Hsu (1984) explica que tanto en el periodo de absorción como en el de equilibrio el mecanismo de difusión del agua es el mismo, por lo cual la ecuación (3) debe permitir describir estos dos periodos, pero ha de tenerse en cuenta que las condiciones de frontera para estos dos periodos son diferentes.

Asumiendo que la concentración de humedad en la superficie de los granos se alcanza inmediatamente después que estos entran en contacto con el medio húmedo y que es igual a la concentración de agua presente en el medio, lo cual puede hacerse debido a que inicialmente ocurre el proceso de adsorción de agua en la superficie de los granos, proceso este muy lento comparado con el proceso de absorción que después tiene lugar. Además, si también se asume que la humedad inicial de los granos es uniformemente distribuida y que la concentración de humedad en el centro del grano es finita, entonces las condiciones iniciales y de frontera para el periodo de absorción quedan expresadas de la siguiente manera (Hsu, 1984):

 para todo en ;

 en y

 en

donde es la concentración inicial de humedad, es la concentración de saturación y es el radio del grano.

La solución de la ecuación (3) sujeta a las condiciones iniciales y de fronteras representadas por (4) viene dada por (Crank, 1975; Hsu, 1984):

donde es el tiempo de absorción. La ecuación (5) es válida para todo En , es decir, en el límite cuando , la ecuación (5) se convierte en:

Integrando la ecuación (5) en todo el volumen del grano esférico se obtiene (Crank, 1975; Hsu, 1984):

donde es la fracción del total de agua absorbible, absorbida después del tiempo, (Hsu, 1984).

Durante el periodo de equilibrio los alrededores inmediatos a los granos deben estar cerca de la saturación, de modo que los pequeños intercambios de humedad que puedan ocurrir entre el grano y sus alrededores son despreciable. Bajo estas circunstancias, la superficie del grano se comporta como si fuese impermeable, pues el movimiento de humedad es restringido casi por completo al interior del grano. Al mismo tiempo, la distribución inicial de concentración será la misma que al final del periodo de absorción. Así, las condiciones iniciales y de frontera para el periodo de equilibrio son (Hsu, 1984):

 en

 en

 en

donde es el perfil de humedad al final del periodo de absorción.

La solución general de la ecuación (3) sujeta a las condiciones iniciales y de frontera presentadas en (8) para el periodo de equilibrio viene dada por (Crank 1975; Hsu):

donde son las raíces positivas de

La ecuación (5) puede interpretarse como la expresión del perfil de humedad en el grano durante el periodo de absorción. El perfil correspondiente al fin del periodo de absorción debe ser al mismo tiempo el perfil de la etapa inicial del periodo de equilibrio. Esto justifica que se sustituya la ecuación (5) en la ecuación (9), con lo que se obtiene (Hsu, 1984):

donde es el tiempo de equilibrio.La ecuación (11) es válida para todo y como puede apreciarse es función de los tiempos y , por lo cual además, puede ser entendida como la ecuación de enlace entre los dos periodos, o que liga a ambos periodos.

Mediante la integración de la ecuación (11) se obtiene la solución específica para el periodo de equilibrio:

Pasando al límite cuando , la ecuación (12) se convierte en:

Como se aprecia en las ecuaciones (12) y (13), en ellas la distribución de humedad durante el periodo de equilibrio se describe como una función no sólo del tiempo de equilibrio y la posición radial sino también del tiempo transcurrido durante el periodo de absorción

El fraccionamiento del proceso de humectación en dos periodos propuesto por Hsu (1984), uno referido a la absorción y otro al equilibrio, si bien constituye una disquisición teórica interesante, en el orden práctico sólo aporta las posibilidad de obtener los tiempos y de los periodos de absorción y de equilibrio respectivamente, para lo cual se requiere, según lo expresado por el propio autor, del conocimiento de las concentraciones inicial y de saturación (), del coeficiente de difusión efectivo y de la humedad final deseada. Para determinar estos parámetros habría que plantear el problema general de humectación de los granos, el cual es similar al problema de contorno definido por las ecuaciones (3-4), en el que cambiarían ligeramente las condiciones iniciales y de frontera, y se obtendría nuevamente la solución dada por las ecuaciones (5) y (7), sólo que en este caso el tiempo es el correspondiente al proceso de humectación. Por tanto, para describir la cinética de humectación de los granos no se requiere emplear el modelo desarrollado por Hsu (1984), es suficiente usar la variante antes esbozada consistente en modelar el problema general de la difusión de humedad en el grano de geometría esférica. Una variante de este proceder es la usada por Agudelo Ospina y Franco Castro (2009) quienes utilizan la solución del problema de difusión radial con coeficiente de difusión constante en una estructura esférica (Crank, 1975) para explicar la difusión de humedad en un grano esférico y particularizan esta solución para el caso de tiempos largos. En este caso, el coeficiente de difusión puede ser calculado mediante la pendiente de la recta vs. que resulta de linealizar la ecuación (Agudelo Ospina y Franco Castro, 2009):

en la que el coeficiente de difusión viene dado por la expresión:

La expresión (15) difiere de la reportada por Agudelo Ospina y Franco Castro (2009), pues ellos escribe en vez de como debe ser.

El procedimiento descrito permite obtener los coeficientes de difusión de la humedad en los granos de geometría esférica, es decir, posibilita caracterizar la cinética de difusión de la humedad en estos granos. Sin embargo, existen otros procedimientos analíticos y numéricos ampliamente usados para este mismo fin. Uno de estos procedimientos consiste en desarrollar la serie de la ecuación (7) o de la ecuación predecesora de la (14) y teniendo en cuenta su rápida convergencia, acotarla en los primeros términos para después, empleando técnicas de ajuste no lineal estimar los coeficientes de difusión efectivos de la humedad en el material en cuestión (Hernández Ruiz et al., 2016). De este modo, los datos experimentales que clásicamente se reportan de la cinética de humectación de los granos () vs. podrían ser ajustados según los modelos no lineales que proporcionan las citadas ecuaciones, después de ser desarrolladas en serie y acotadas, para así obtener el coeficiente de difusión efectivo de la humedad en los granos, tal cual se ha realizado con otros materiales.

El conocimiento de los coeficientes de humectación de los materiales en determinadas condiciones de humedad y temperatura informan de la rapidez con que dicho material incorpora humedad bajo tales condiciones. Además, resulta de interés tanto desde la perspectiva de la cinética de humectación de un material, como desde la termodinámica del sistema, encontrar la dependencia del coeficiente de difusión con la temperatura. Usualmente, esta dependencia se describe por la ley de Arrhenius, en la forma (Hsu, 1983ª, Bello et al., 2010):

donde es el coeficiente de difusión a la temperatura de 0 K; es la energía de activación, es la constante universal de los gases y es la temperatura absoluta o temperatura termodinámica expresada en Kelvin.

La linealización de esta ecuación y el ajuste de los datos según el modelo lineal correspondiente permite verificar si para el material en cuestión la dependencia del coeficiente de difusión con la temperatura obedece a la ley de Arrhenius, en cuyo caso, a partir de la pendiente de la recta vs. , se determina la energía de activación del material. Una vez conocida la energía de activación es posible determinar otros parámetros termodinámicos del sistema, tales como entalpia, entropía y otros.

**2.2 Modelos empíricos. El modelo de Peleg**

Como se explicó antes, la cinética de trasferencia de agua en granos y materiales alimenticios ha sido modelada empleando tanto modelos basados en las leyes de la difusión, cuya solución puede ser analítica y/o numérica, como modelos empíricos. Dentro de estos últimos ha sido ampliamente reportado el uso del modelo propuesto por Peleg (1988) a partir de la similitud existente entre las curvas de absorción de agua con el tiempo por parte de materiales alimenticios y las curvas correspondientes a otros procesos y fenómenos físicos, en particular el fenómeno de acumulación de carga electrostática durante el proceso de compactación de determinados polvos y el comportamiento del fenómeno de la fluencia mecánica. De acuerdo con Sopade y colaboradores (Sopade et al., 1992) hasta el momento en que Peleg propone su modelo (Peleg, 1988) existían una amplia cantidad de estudios que evaluaban el proceso de hidratación de materiales alimenticios basándose en las leyes de difusión de Fick. En opinión de Sopade y colaboradores (Sopade et al., 1992) las ecuaciones de la difusión requieren de numerosas funciones y parámetros, por lo cual son complejas y engorrosas, y para su solución se requiere el uso de computadoras de alta potencia. El propio Sopade y Obekpa (Sopade y Obekpa, 1990) ya habían señalado la simplicidad del modelo de Peleg en comparación con otros modelos, particularmente aquellos basados en las leyes de difusión de Fick. En la época en que Sopade y colaboradores exponen este criterio no existía el desarrollo computacional actual, ni tampoco se contaba con los software especializados de que se dispone hoy día, que permiten de forma simple el procesamiento de los datos que se obtienen de los experimentos clásicos de humectación de un material con el tiempo.

El modelo de Peleg (1988) es una propuesta matemática simple, que además de su fácil manejo, ha sido validado en la modelación de fenómenos de absorción de agua en alimentos y granos (Sopade y Obekpa 1990; Sopade et al., 1992, Sopade y Kaimur, 1999; Turhan, 2002; Sopade et al., 2007, Quicazan et al., 2012, Montanuci et al., 2013; Tiaya Mbou, 2017). En la nota de investigación publicada por Peleg (1988), este autor propone una ecuación de absorción de dos parámetros y muestra su validez de predicción durante su aplicación para describir la cinética de la absorción de vapor de agua en leche en polvo y en arroz integral, y durante la absorción de agua por arroz integral en remojo. El modelo de Peleg establece que el contenido de humedad absorbida por un material dado en un tiempo *t* viene dado por la ecuación:

donde es contenido de humedad inicial y y son las constantes de Peleg. El signo “+” que antecede el segundo término del miembro izquierdo de la ecuación de Peleg se refiere a procesos tanto de adsorción como de absorción, mientras que si aparece el signo “-“, entonces los procesos son de secado y/o desorción (Montanuci et al., 2013). Las constantes y tienen unidades de tiempo por unidad de masa y de inverso de masa respectivamente, por lo cual ellas están asociadas con el inverso de la tasa o ritmo de absorción y con el inverso de la capacidad de absorción del material respectivamente. De acuerdo con Montanuci y colaboradores (Montanuci et al., 2013)podría compararse con un coeficiente de difusión y se le denomina constante de velocidad de Peleg, mientras que es un parámetro característico asociado con la capacidad de absorción del material en estudio y se le llama constante de capacidad de Peleg.

La tasa de sorción en un instante determinado se puede obtener a partir de la primera derivada de la ecuación (15):

La constante de velocidad de Peleg se relaciona con la velocidad de sorción en el instante inicial, i.e.:

de este modo, la constante puede estar relacionada con el coeficiente de difusión solo en los primeros instantes del proceso de absorción. Luego, no es posible identificar a la constante con el coeficiente de difusión que aparece en los modelos derivados de las leyes de Fick.

La constante de capacidad de Peleg se relaciona con el máximo (o mínimo) contenido de humedad que puede alcanzarse, o sea, con la humedad de equilibrio. Como, de acuerdo con este modelo, la humedad de equilibrio () se alcanza cuando , entonces:

De acuerdo con Montanici y colaboradores (Montanuci et al., 2013) varios autores han verificado que decrece con el aumento de la temperatura, en tanto no manifiesta una única tendencia, pues en algunos estudios no se aprecia una dependencia significativa de con la temperatura (Sopade y Obekpa, 1990; Sopade et al., 1992), mientras que en otros casos, también decrece al aumentar la temperatura (Resio et al., 2006; Pan y Tangratanavalee, 2003; Montanuci et al., 2013).

La forma lineal de la ecuación (15) se escribe como:

por lo que del ajuste de los datos de absorción según el modelo lineal ( vs. ) las constantes y constituyen el intercepto y la pendiente de la recta de ajuste respectivamente.

La dependencia del recíproco de con la temperatura ha sido ampliamente investigada (Sopade et al., 1992; Turhan et al., 2002, Agudelo Ospina y Franco Castro, 2009; Montanuci et al., 2013). Sopade y colaboradores (Sopade et al., 1992) han expresado que puede ser comparada con un coeficiente de difusión, de modo que la ecuación de Arrhenius podría usarse para describir la dependencia de esta constante de la temperatura:

Análogamente a como ocurre en el caso de la dependencia del coeficiente de difusión con la temperatura, a partir de la pendiente de la recta vs. , se determina la energía de activación del material, y una vez conocida la energía de activación es posible determinar otros parámetros termodinámicos del sistema, tales como entalpia, entropía y otros (Montanuci et al., 2013).

El modelo de Peleg si bien es ampliamente usado en el estudio de la absorción de agua por materiales alimenticios y granos, no fue obtenido a partir leyes físicas ni de la teoría de la difusión por lo cual es solo un modelo empírico que permite obtener las constantes de Peleg, a saber: las constantes de velocidad y de capacidad, las cuales brindan información sobre la rapidez con que el material incorpora agua en el instante inicial del proceso de hidratación y la capacidad de absorción que posee el material, y a partir de la primera de estas constantes y de su cambio con la temperatura los parámetros termodinámicos del sistema, no permite la descripción completa de la cinética de humectación del material, cuestión que solo es posible lograr con modelos en bases a las leyes de la difusión de Fick.

**3. Conclusiones**

A partir de la revisión descrita en el presente artículo, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

* El contenido de humedad y la temperatura son los factores críticos que determinan la conservación de los granos almacenados. El adecuado control y manejo de estas variables en granos almacenados por tiempos prolongados permite mitigar sus efectos negativos sobre la durabilidad de los granos, la cual está críticamente determinada por la velocidad con la cual la humedad se infiltra y se mueve a través de la estructura del grano.
* La técnica más empleada en la conservación de los granos es la refrigeración. La refrigeración de los granos almacenados en silos debe ser complementada con el control riguroso de la humedad y la temperatura, así como del conocimiento de la dependencia temperatura vs. humedad para cada tipo de grano almacenado. En la revisión realizada no se encontraron reportes de estudios sobre este particular en las condiciones propias del clima tropical y húmedo cubano.
* La técnica experimental más usada en los estudios de humectación de los granos es la gravimétrica. Esta técnica consiste en determinar los incrementos (decrementos) en masa húmeda de los granos en el tiempo, no requiere de recursos costosos para su implementación y el procedimiento para el ulterior procesamiento de los datos es sencillo.
* El transporte de humedad en los granos puede ser descrito satisfactoriamente empleando modelos basados en la teoría clásica de la difusión y modelos empíricos. Entre los modelos más empleados, de los basados en las leyes de Fick de la difusión se encuentran los que asumen que la absorción de humedad trascurre con coeficiente de difusión constante, mientras entre los empíricos el más ampliamente usado es el modelo de Peleg. De estos modelos, solo los basados en las leyes de Fick permiten caracterizar integralmente la cinética de humectación de los granos.

**4. Estudio futuros y perspectivas**

Estudios futuros deben comprender la determinación de las leyes de cambio de varias propiedades de diferentes tipos de granos con su incremento en masa humedad, y a partir de estas leyes, se determinaran los incrementos en masa húmeda límite para cada tipo de grano. Al mismo tiempo, se caracterizará la cinética de humectación de los diferentes tipos de granos, en atmósferas con humedades relativas y temperaturas típicas del clima cubano, tropical y húmedo. Empleando los resultados de ambos estudios, se estimaran los tiempos óptimos de almacenamiento de los diferentes tipos de granos a una temperatura y humedad relativa dada.

**5. Referencias bibliográficas**

1. Aguerre, R.J., Gabitto, J.F., Chirife, J., 1985. Utilization of Fick’s second law for the evaluation of diffusion coefficient in food process controlled by internal diffusion. Journal of Food Technology Vol. 20, 623–629.
2. Agudelo Ospina, J. F. y Franco Castro, R. A. (2009) Law enforcement Fick and Peleg model for study of water uptake in navel cargamanto yellow (phaseolus vulgaris l.) and peas seca (pisan sativa) during rehydration. Revista Publicaciones e Investigación Vol. 3, No. 1.
3. Bello, M., Tolaba, M.P., Aguerre, R.J. y Suarez, C. (2010) Modeling water uptake in a cereal grain during soaking. Journal of Food Engineering 97, 95–100.
4. Casada, M.E. (2002) Moisture adsorption characteristics of wheat and barley. American Society of Agricultural Engineers: Transactions of the ASAE Vol. 45, No. 2, 361-368.
5. Converse, H. H., Groves, A. H. y Chung, D. (1973) Transient heat transfer within wheat stored in a cylindrical bin. American Society of Agricultural Engineers: Transactions of the ASAEVol.16, No. 1, 129-133.
6. Chung, D. S. y Converse, H. H (1971) Effect of Moisture Content on Some Physical Properties of Grains. American Society of Agricultural Engineers: Transactions of the ASAE, 612-620.
7. Crank, J. (1975) The mathematics of diffusion. 2a ed. New York: Oxford University Press.
8. Deshpande, S. D., Bal, S. y Ojha, T. P. (1994) A Study on Diffusion of Water by the Soybean Grain During Cold Water Soaking. Journal of Food Engineering Vol. 23, 121 – 127.
9. Engels, C., Hendrickx, M., de Semblanx, S., de Gryze, I. y Tobback, P. (1986) Modelling water diffusion during long-grain rice soaking. Journal of Food Engineering 5, 55–73.
10. Fick, A. (1855) On liquid diffusion, The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science Vol. 10, No. 63, 30-39.
11. Hernández-Ruiz, J.E., Quintana Puchol, R. y Pino Rivero, L. (2016) Humectation Kinetics of a quasi-ceramic matrix destined to agglomerated fluxes for Submerged Arc Welding. TMS 2016 Annual Meeting & Exhibition, Symposium: Characterization of Minerals, Metals, and Materials, Session: Welding and Solidification, Music City Center, Downtown Nashville, Tennessee. USA. February 14-18, 18 pages.
12. HSU, K. H. (1983) A diffusion model with a concentration-dependent diffusion coefficient for describing water movement in legumes during soaking. Journal of Food Science, Vol. 48, No. 2, 618-622.
13. HSU, K. H. (1983a) Effect of temperature on water diffusion in soybean. Journal of Food Science, Vol. 48, No. 4, 1364-1365.
14. Hsu, K. H. (1984) A theoretical approach to the tempering of grains. Cereal Chem. Vol. 61, No. 5, 466-470.
15. Jian, F., Jayas, D.S. y White, N.D.G. (2009) Temperature fluctuations and moisture migration in wheat stored for 15 months in a metal silo in Canada. Journal of Stored Products Research Vol. 45, 82–90.
16. Kang, S. y Delwiche, S. R. (1999) Moisture diffusion modeling of wheat kernels during soaking. American Society of Agricultural Engineers: Transactions of the ASAE Vol. 42, No. 5, 1359-1365.
17. Khankari, K. K., Morey, R. V. y Patankar, S. V. (1994) Mathematical model for moisture diffusion in stored grain due temperature gradients. American Society of Agricultural Engineers: Transactions of the ASAE Vol. 37, No. 5, 1591-1604.
18. Lu, R. y Siebenmorgen, T. J. (1992) Moisture diffusivity of long-grain rice components. American Society of Agricultural Engineers: Transactions of the ASAE Vol. 35, No. 6, 1955-1961.
19. Montanuci, F.D., Matos Jorge, L. M. y Matos Jorge R.M. (2013) Kinetic, thermodynamic properties, and optimization of barley hydration. Food Science and Technology Vol. 33, No. 4, 690-698.
20. Muthokumarappan, K. y Gunasekaran, S. (2008) Chapter 3: Modeling moisture diffusion in food grains during adsorption. En: Food processing operations modeling. Design and analysis. Eds.: S. Jun y J.M. Irudayaraj, CRC Press Taylor & Francis Group. © 2009.
21. Navarro, S., Noyes, R., Armitage, D. y Maier, D. (2002) Objectives of aeration. En: The Mechanics and Physic of Modern Grain Aeration Management, eds. S. Navarro y R. Noyes. New York: CRC Press.
22. Nelson, S. O. (1981) Review of factors influencing the dielectric properties of cereals grains. Cereal Chem. Vol. 58, No. 6, 487-492.
23. Nelson, S. O., y Kraszewski, A. W. (1990) Grain moisture content determination by microwave measurements. American Society of Agricultural Engineers: Transactions of the ASAE Vol. 33, No. 4, 1303-1307.
24. Nelson, S. O., Trabelsi, S. y Kraszewski A. W. (1998) Advances in sensing grain moisture content by microwave. American Society of Agricultural Engineers: Transactions of the ASAE Vol. 41, No.2, 483-487.
25. Nelson, S. O., Trabelsi, S. y Kraszewski, A. W. (2001) RF Sensing of Grain and Seed Moisture Content. IEEE Sensors J. Vol. 1, No. 2, 119-126.
26. Pan, Z., Tangratanavalee, W. (2003) Characteristics of soybeans as affected by soaking conditions. Lebensmittel-Wissenschaft und -Technologie Vol. 36, No. 1, 143-151.
27. Paucar Nemacho, L. M. Respiración y patología de los granos y semillas (Presentación) Universidad Nacional del Santa, Perú. Disponible en: http://biblioteca.uns.edu.pe/saladocentes/archivoz/curzoz/001\_4ta\_clase\_granos\_ysemillas.pdf (consultada en febrero de 2017).
28. Peleg, M. (1988) An empirical model for the description of moisture sorption curves, Journal of Food Science Vol. 53, 1216-1219.
29. Pérez, J., Tanaka, F., Hamanaka, D. y Uchino, T. (2014) Numerical Modeling of Heterogeneous Moisture Diffusion in Milled Rice Grains: Diffusion Coefficient as a Function of Moisture, Temperature and Time. Food Science and Technology Research Vol. 20, No. 1, 59-64.
30. Pixton, S. W. y Griffiths, H. J. (1971) Diffusion of Moisture through Grain. J. Stored Prod. Res. Vol. 7, 133-152.
31. Pixton, S. W. y Warburton, S. (1971) Moisture Content/Relative Humidity Equilibrium of Some Cereal Grains at Different Temperatures. *J. Stored Prod. Res.* Vol. 6, 283-293.
32. Quicazán, M. C., Caicedo L. A. y Cuenca, M. (2012) Applying Peleg's equation to modelling the kinetics of solid hydration and migration during soybean soaking. Ingeniería e investigación Vol. 32, No. 3, 53-57.
33. Quintana Puchol, R., Prieto-Garcia, O., Hernández-Ruiz, J.E., Cruz-Crespo, A., Carlos R. Gómez-Pérez y Perdomo-González, L. (2006) Desarrollo de una matriz fundida obtenida a partir de caolín y dolomita para un fundente aglomerado destinado al recargue por soldadura automática, Soldagem & Inspeçao, Vol. 11, No. 3, 156-163.
34. Resio, A. C., Aguerre, R. J., Suarez, C. (2006) Hydration kinetics of amaranth grain. Journal of Food Engineering Vol. 72, No. 3, 247- 253.
35. Reuss, R., Danicevski, K. y Annist, P.C. (1994) The impact of temperature, moisture content, grain quality and their interactions changes in storage vessel atmospheres. Proceedings of the 6th International Conference of Stored Product Protection, Vol. I, 178-182. Publisher CAB International, Wallingford, Oxin, UK.
36. Sadaka, S. y Bautista, R. (2014) Grain Drying Tools: Equilibrium Moisture Content Tables and Psychrometric Charts. Publicado por: Division of Agriculture and Extension. University of Arkansas System. Disponible en: https://www.uaex.edu/publications/pdf/FSA-1074.pdf (consultada en febrero de 2017).
37. Sawant, A. A., Patil, S. C., Kalse, S. B. y Thakor, N. J. (2012) Effect of temperature, relative humidity and moisture content on germination percentage of wheat stored in different storage structures. Agric. Eng. Int.: CIGR Journal Vol. 14, No. 2, 1-14.
38. Seifi, R.F. y Alimardani, R. (2010) The Moisture Content Effect on Some Physical and Mechanical Properties of Corn (Sc 704). Journal of Agricultural Science Vol. 2, No. 4, 125-134.
39. Seyda, N., Mohmand, A. S. y Roidar Khan, B. (2000) The effect of storage temperature storage period and seed moisture content on seed viability to soybean. Pakistan Journal of Biological Sciences Vol. 3, No. 12.
40. Smith, E. A. y Sokhansanj, S. (1990) Moisture Transport Caused by Natural Convection in Grain Stores. J. Agric. Eng. Res. Vol. 47, 23-34.
41. Sopade, P. A., Ajisegiri, E. S. y Badau, M. H. (1992) The use of Peleg’s Equation to model water absorption in some cereal grains during soaking. Journal of Food Engineering Vol. 15, No. 4, 269-283.
42. Sopade, P. A. y Obekpa, J. A. (1990) Modelling water absorption in soybean, cowpea and peanuts at three temperatures using Peleg’s equation. Journal of Food Science Vol. 55, No. 4, 1084-1087.
43. Sopade, P. A., y Kaimur, K. (1999) Application of Peleg’s equation indesorption of food systems.A case study with sago (Metroxy-lon sagu rottb.) starch. Drying Technology, Vol. 17, 975–989.
44. Sopade, P. A., Yu Xun, P., Halley, P. J. y Hardin, M. (2007) Equivalence of the Peleg, Pilosof and Singh–Kulshrestha models for water absorption in food. Research note. Journal of Food Engineering, Vol. 78, 730–734.
45. Stapley, A. G. F. Fryer, P. J. y Gladden, L. F. (1998) Diffusion and Reaction in Whole Wheat Grains during Boiling. AIChE Journal Vol. 44, No. 8, 1777-1789.
46. Tiaya Mbou, E., Njeugna, E., Kemajou, A., Tagne Sikame, N. R. y Ndapeu, D. (2017) Modelling of the Water Absorption Kinetics and Determination of the Water Diffusion Coefficient in the Pith of Raffia vinifera of Bandjoun, Cameroon. Advances in Materials Science and Engineering Vol. 2017, Article ID 1953087, 12 pages https://doi.org/10.1155/2017/1953087
47. Thorpe, G. R. (1981) Moisture diffusion through bulk grain. J. Stored Prod. Res. Vol. 17, 39-42.
48. Thorpe, G. R. (1982) Moisture diffusion through bulk grain subjected to a temperature gradient. J. Stored Prod. Res. Vol. 18, 9-12.
49. Thorpe, G.R., Tapia, J.A.O. y Whitaker, S. (1991) The diffusion of moisture in food grains. I. The development of a mass transport equation. Journal of Stored Products Research Vol. 27, No. 1, 1–9.
50. Thorpe, G.R., Tapia, J.A.O. y Whitaker, S. (1991) The diffusion of moisture in food grains. II. Estimation of the effective diffusivity. Journal of Stored Products Research Vol. 27, No. 1, 11–30.
51. Turhan, M., Sayar, S., y Gunasekaran, S. (2002) Application of Peleg model to study water absorption in chickpea during soaking. Journal of Food Engineering, Vol. 53, 153–159.
52. Uddin, M. S., Armstrong, P. R. y Zhang, N. (2005) Accuracy of grain moisture content prediction using temperature and relative humidity sensors. Applied Engineering in Agriculture Vol. 22, No. 2, 267-273.
53. Vertucci, C. W., Ross, E. E. y Crane, J. (1994) Theoretical protocols for seed storage III. Optimum moisture contents for pea seeds stored at different temperatures. Annals of Botany Vol. 74, 531-540.
54. Wahengbam, D.E., Abdul, S. Hazarika, M.K. (2019) Water uptake in brown rice during soaking for production of no-cooking rice. Agric. Eng. Int: CIGR Journal Open access at http://www.cigrjournal.org Vol. 21, No. 3, 12 pages.
55. Xanthopoulos, G. y Woods, J.L. (2003) A two-dimensional Model of Grain Storage with Dynamic Visualizations: Predictions for Temperature, Moisture Content, Germination and Respiration - a case study for rapeseed. Agro Thesis Vol. 1, No. 1, 19-27.