



## Procedimento para medição do fator de anisotropia de fontes de nêutrons

Creazolla<sup>a</sup>, P.; Astuto, A.; Silva, F.; Camargo, A. ; Pereira, W.

<sup>a</sup>LN/LNMRI, Instituto de Radioproteção e Dosimetria, 22780160, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

*prycyllacreazolla@gmail.com*

---

### RESUMO

As fontes radioisotópicas de nêutrons permitem a produção de campos de referência para calibração de dispositivos de medição de nêutrons para fins de radioproteção e dosimetria. Quando a taxa de emissão dessas fontes se dá de forma isotrópica, nenhuma correção é necessária. Entretanto, variações no material de encapsulamento da fonte, variações na concentração do material emissor e a geometria da fonte podem produzir diferenças na intensidade da emissão de nêutrons em relação ao eixo axial da fonte. Este efeito é denominado anisotropia. Nesse artigo é apresentada uma proposta de procedimento técnico realizado no Laboratório de Metrologia de Nêutrons LN/LNMRI para medição experimental do fator de anisotropia das fontes de nêutrons de <sup>241</sup>Americío-Berílio (<sup>241</sup>AmBe) e <sup>238</sup>Plutônio-Berílio (<sup>238</sup>PuBe), utilizando o detector *Precision Long Counter* (PLC). Esse procedimento é realizado a partir do alinhamento da fonte no eixo horizontal com o detector a 2 metros de distância, em seguida são realizadas medições da taxa de emissão de nêutrons variando em ângulos de 10° a posição da fonte em relação ao seu eixo axial. A partir do procedimento e do cálculo para obtenção dos coeficientes de anisotropia das fontes analisadas, foi possível constatar variações na emissão de nêutrons, na fonte de <sup>241</sup>AmBe 592 GBq a anisotropia foi determinada em 8,65%, na fonte <sup>241</sup>AmBe 185 GBq foi de 2,76% e na fonte <sup>238</sup>PuBe 1,85 TBq o fator de anisotropia foi definido em 4,35%. Isso corrobora a necessidade de um procedimento que vise contribuir com a redução de incertezas associadas ao uso de fontes de nêutrons.

*Palavras-chave: fonte de nêutron, anisotropia, emissão de nêutron.*

---

---

**ABSTRACT**

Radioisotope sources of neutrons allow the production of reference fields for calibration of neutron measurement devices for radiation protection and dosimetry purposes. When the emission rate of these sources is isotropic, no correction is necessary. However, variations in the source encapsulation material and in the radioactive material concentration and the source geometry can produce differences in neutron emission intensity relative to the axial axis of the source. This effect is called anisotropy. This paper presents a proposal for a technical procedure performed at the Laboratório de Metrologia de Nêutrons LN/LNMRI for the experimental measurement of the anisotropy factor of  $^{241}\text{AmBe}$  and  $^{238}\text{PuBe}$  neutron sources, using the Precision Long Counter (PLC) detector. This procedure is performed from the alignment of the source on the horizontal axis with the detector at 2 meters distance, and then measurements are made of the neutron emission rate varying at  $10^\circ$  angles the position of the source in relation to axial axis. From the procedure and the calculation to obtain the anisotropy coefficients of the analyzed sources, it was possible to verify variations in the emission of neutrons, in the source of  $^{241}\text{AmBe}$  592 GBq the anisotropy was determined in 8.65%, in the source  $^{241}\text{AmBe}$  185 GBq was of 2.76% and in the source  $^{238}\text{PuBe}$  1.85 TBq the anisotropy factor was defined as 4.35%. This corroborates the need for a procedure aimed at contributing to the reduction of uncertainties associated with the use of neutron sources.

*Keywords: anisotropy, neutrons sources, neutron emission.*

---

## 1. INTRODUÇÃO

A metrologia de nêutrons ao atuar na calibração de monitores de área para nêutrons necessita utilizar uma fonte de nêutrons padronizada em um sistema absoluto tal como o Banho de Sulfato de Manganês ou que seja calibrada em um sistema secundário como o detector do tipo Precision Long Counter (PLC). Sendo assim, conhecendo o espectro em energia de uma fonte de nêutrons e a taxa de emissão dessa fonte pode-se construir um modelo simples em que, num espaço amplo e livre de obstáculos, estejam posicionados a fonte de nêutrons e o monitor de área a ser calibrado. Entretanto, uma correção a ser considerada para este modelo está relacionada à construção das fontes de nêutrons. Os fabricantes constroem as fontes de nêutrons baseadas em radionuclídeos com encapsulamentos em aço e em geometrias cilíndricas que seguem rigorosas regras para garantir a sua integridade. Porém, é necessário levar em conta que pode haver pequenas diferenças nessa distribuição e na espessura de aço ao redor do material radioativo. Isto causa efeitos de anisotropia na emissão de nêutrons, devido às diferenças produzidas na taxa de emissão de nêutrons em relação ao eixo axial da fonte <sup>[1]</sup>. Nesse trabalho será apresentada uma proposta de um procedimento técnico para medição experimental do fator de anisotropia das fontes pertencentes ao Laboratório de Metrologia de Nêutrons LN/LNMRI utilizando o PLC.

## 2. DETERMINAÇÃO DE ANISOTROPIA

O Laboratório de Baixo Espalhamento (LBE) do LN/LNMRI possui dimensões laterais de 7,8 m x 18 m por 6 m de altura do piso ao teto. Para minimizar o espalhamento, o LBE é constituído de materiais com número atômico baixo e segue as recomendações da ISO em relação às dimensões físicas que um salão de baixo espalhamento deve possuir a fim de que seja minimizada a contribuição do espalhamento. O sistema fonte-detector fica posicionado em uma plataforma elevada a 1,86 m do solo <sup>[2]</sup>.

Um procedimento padrão de medição de anisotropia em fontes de nêutrons pode ser realizada usando o detector do tipo PLC que consiste essencialmente em um conjunto de moderador cilíndrico de polietileno com um detector BF<sub>3</sub> para nêutrons lentos, disposto ao longo do seu eixo <sup>[3]</sup>.

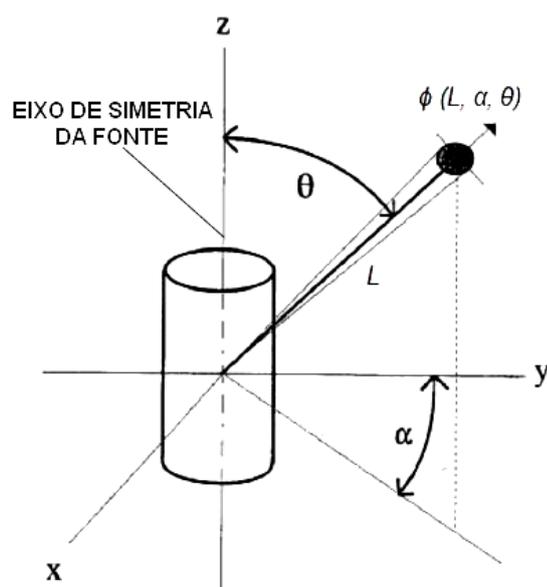
As principais vantagens deste contador para a medição da fluência de nêutrons e, conseqüentemente, para calibração é que ele possui uma alta eficiência para detecção rápida de nêutrons, uma resposta relativamente uniforme aos nêutrons de diferentes energias e uma boa discriminação de raios gama.

Foi utilizado, nesse trabalho, um sistema mecânico de rotação de fontes (figura 1) controlado eletronicamente para evitar repetidas aproximações do operador com a fonte em cada medição. Esse sistema é composto por um motor de passo de quatro fases (NEMA 17), com 200 passos por volta, acoplado a uma caixa de redução (redução aproximada de 25:1). Para o controle do motor foi utilizada uma placa controladora (driver) e uma placa do ARDUINO, que proporciona a interface computador/motor. E um programa específico do ARDUINO foi desenvolvido para a movimentação do motor.

**Figura 1:** Sistema mecânico de rotação de fontes

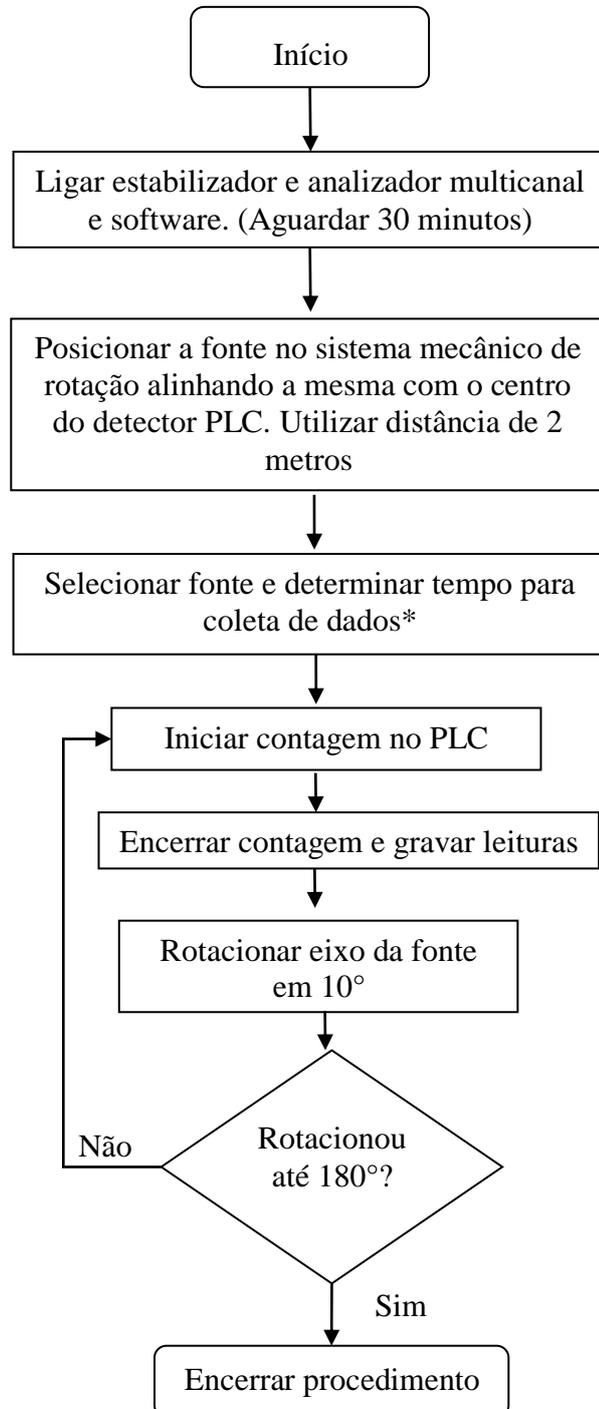


A medição da emissão de nêutrons ocorre em função do ângulo polar  $\theta$  entre a direção do detector e o eixo da fonte, como pode ser observado na figura 2. Dessa forma, a medição de anisotropia é realizada a partir do alinhamento horizontal da fonte com o detector a uma distância de 2 metros<sup>[4]</sup>.

**Figura 2:** Sistema de coordenadas de uma fonte cilíndrica com emissão anisotrópicaFonte: ISO 8529-1, 2001<sup>[5]</sup>

O eixo da fonte foi orientado de forma que pudesse estar alinhado ao detector e a fonte foi posicionada no sistema mecânico de rotação, o que permitiu que a fonte pudesse ser girada a partir do ângulo de  $0^\circ$  até  $180^\circ$ . Foram realizadas 19 medições durante 900 segundo cada, variando em ângulos de  $10^\circ$  e também, foram realizadas 5 medições na posição de  $90^\circ$  em relação ao eixo cilíndrico da fonte sem alterar o intervalo de tempo. O fluxograma do procedimento pode ser analisado na Figura 3.

**Figura 3:** Fluxograma representando o procedimento para determinação da Anisotropia de fontes de nêutrons



\*O tempo para coleta deve ser selecionado de forma a manter a incerteza em aproximadamente 1% sobre a contagem média.

### 3. METODOS DE CÁLCULO DE ANISOTROPIA

Na ausência de qualquer meio de dispersão, a taxa de fluência de nêutrons,  $\phi(L, \theta)$ , em um ângulo  $\theta$ , medido em relação ao eixo do cilindro a um determinado ponto de calibração numa distância  $L$  do centro da fonte, é representada pela equação (1), para uma taxa de emissão total absoluta  $B$  e fator de anisotropia  $F_I(\theta)$ . Sua unidade é dada em  $(\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$  [1,6]:

$$\phi(L, \theta) = \frac{B F_I(\theta)}{4\pi L^2} \quad (1)$$

Se a emissão de nêutrons de uma fonte cilíndrica depender somente do ângulo  $\theta$ , uma vez que a emissão varia menos para a direção perpendicular ao eixo ( $\theta=90^\circ$ ), aplica-se então a expressão (2), sendo experimentalmente determinada com um detector do tipo PLC [1,4].

$$F_I(\theta) = \frac{2\phi(L, \theta)}{\int_{\theta=0}^{\pi} \phi(L, \theta) \sin \theta d\theta} \quad (2)$$

A integral pode ser substituída pela soma dos fatores de anisotropia  $F_I(\theta_i)$ , pois ambas as funções na integração apresentam-se contínuas dentro dos limites de integração para cada ângulo de medição  $\theta_i$  [4]. Onde  $C(L, \theta_i)$  é a taxa de contagem no ângulo  $\theta_i$  corrigida para os efeitos de tempo morto numa distância  $L$  e aplicado para todos os ângulos entre  $(\theta_{i-1} + \theta_i)/2$  e  $(\theta_i + \theta_{i+1})/2$  [6]. Sendo assim, modificando a equação (2) para a equação (3) pode-se avaliar os coeficientes de anisotropia num ângulo  $\Theta$  a partir do eixo da fonte.

$$F_I(\Theta) = \frac{2C(L, \Theta)}{\sum_{i=1}^n C(L, \theta_i) \times \left[ \cos\left(\frac{\theta_{i-1} - \theta_i}{2}\right) - \cos\left(\frac{\theta_i + \theta_{i+1}}{2}\right) \right]} \quad (3)$$

A determinação do fator de anisotropia no ângulo de  $90^\circ$  em relação ao eixo cilíndrico da fonte possui uma importância maior por ser a direção mais usada para a calibração do detector e ter uma variação mínima de emissão com o ângulo. Portanto, é desejável fazer medições extras nesta direção para  $F_I$  ( $\theta=90^\circ$ ) a fim de reduzir a incerteza estatística [4,5].

#### 4. RESULTADOS

De acordo com a equação de anisotropia (3), foram obtidos os coeficientes de anisotropia das principais fontes usadas no LN (tabela 1). E os resultados das medições experimentais do fator de anisotropia das diferentes fontes de nêutrons de  $^{241}\text{AmBe}$  e de  $^{238}\text{PuBe}$  do LN estão representadas graficamente pelas figuras abaixo.

A partir da análise dos resultados dos coeficientes de anisotropia, é possível observar que os maiores valores obtidos foram devidos às maiores razões entre o diâmetro e a altura das fontes, conforme pode ser observado na tabela 1. Para que uma fonte seja considerada como sendo uma fonte pontual, ela deve apresentar o valor de 1 em cada ângulo de medição. Portanto, valores abaixo ou superiores a 1 no ângulo de  $90^\circ$  indicam o fator anisotrópico da fonte de nêutrons analisada [4].

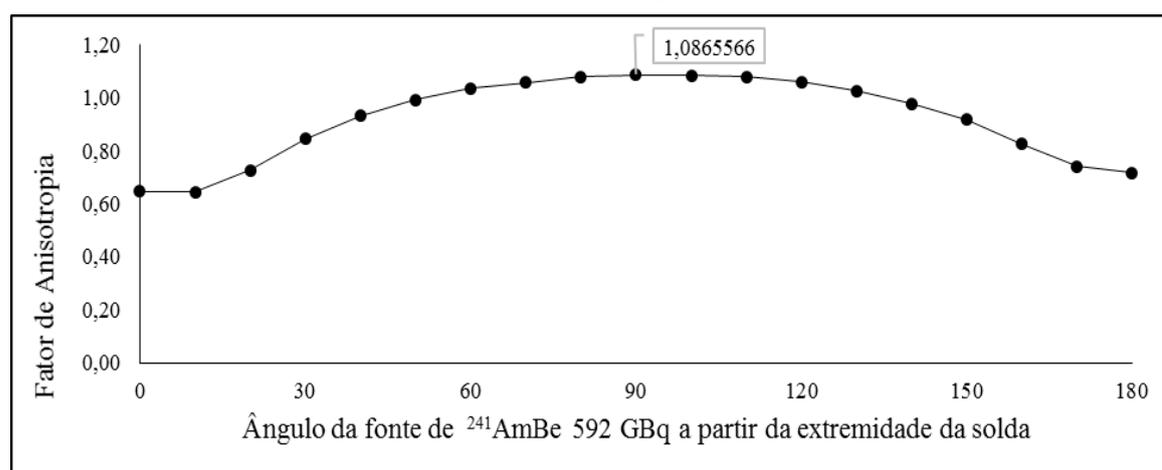
**Tabela 1:** Especificação das fontes de nêutrons do LN usadas no estudo

Fonte	Encapsulamento	Atividade (GBq)	Diâmetro (mm)	Altura (mm)
$^{241}\text{Am-Be}$	-	592	33	106
$^{241}\text{Am-Be}$	SN4	185	35	35
$^{238}\text{Pu-Be}$	-	1850	57	33

#### 4.1. $^{241}\text{AmBe}$ 592 GBq

Os resultados mostraram variação uniforme de anisotropia com o ângulo. Sua anisotropia foi determinada em 8,65% devido às variações na estrutura do material radioativo e maior razão entre a altura e o raio de seu encapsulamento cilíndrico.

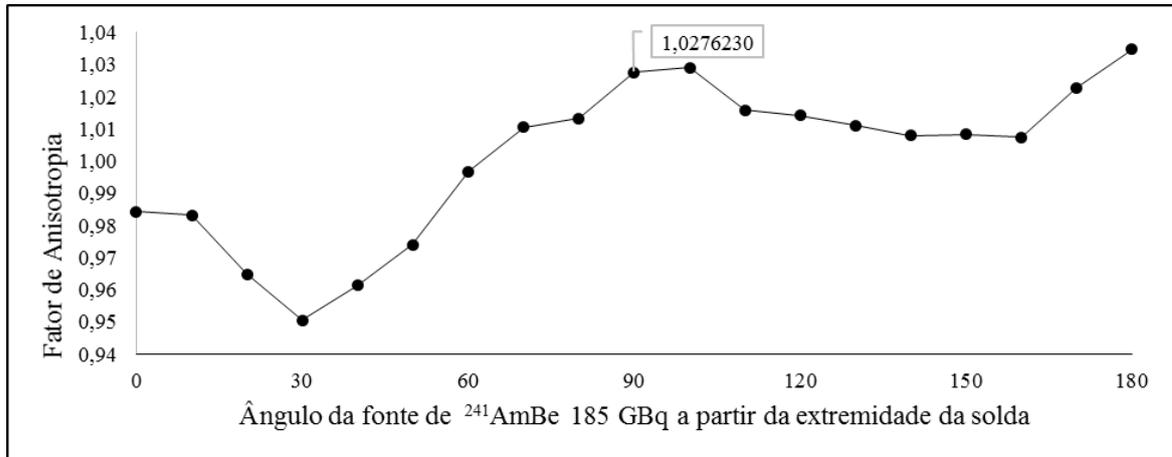
**Figura 4:** Fatores de anisotropia para a fonte de nêutrons encapsulada de  $^{241}\text{AmBe}$  592 GBq



#### 4.2. $^{241}\text{AmBe}$ 185 GBq

Os coeficientes de anisotropia de cada ângulo da fonte de nêutrons de  $^{241}\text{AmBe}$  185 GBq pode ser analisado no gráfico da figura 5. Os resultados apresentaram variação na emissão de nêutrons em relação ao eixo axial da fonte, principalmente entre os ângulos entre  $0^\circ$  a  $90^\circ$ , e, portanto, ela não é considerada como sendo uma fonte pontual. Seu valor de anisotropia é de 2,76%.

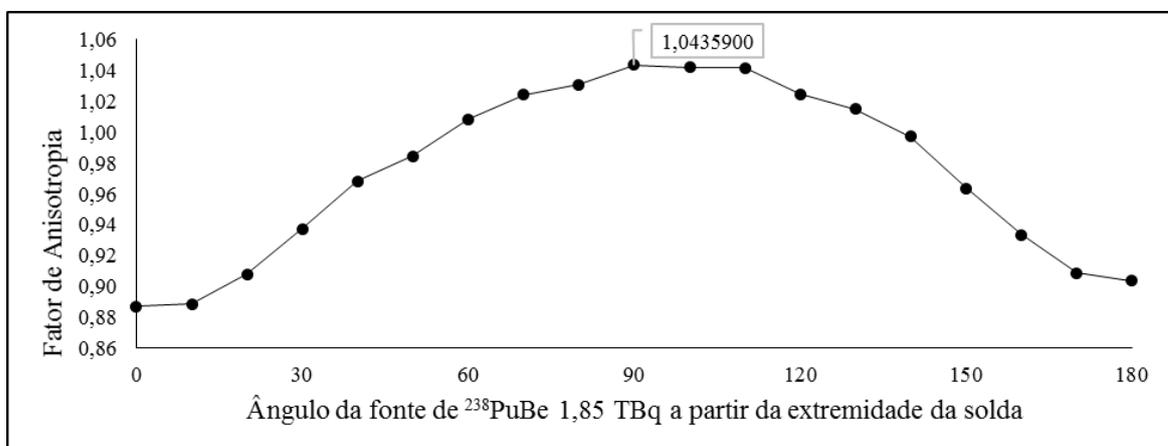
**Figura 5:** Fatores de anisotropia para a fonte de nêutrons encapsulada de  $^{241}\text{AmBe}$  185 GBq



#### 4.3. $^{238}\text{PuBe}$ 1,85 TBq

O fator de anisotropia foi determinado em 4,35%. Os resultados mostraram que a fonte de  $^{238}\text{PuBe}$ , mesmo tendo maior atividade, possui menor fator de anisotropia comparado com a fonte de  $^{241}\text{AmBe}$  592 GBq, pois a sua razão altura versus raio está mais próximo de 1.

**Figura 6:** Fatores de anisotropia para a fonte de nêutrons encapsulada de  $^{238}\text{PuBe}$  1,85 TBq



## 5. CONCLUSÕES

Considerando que fontes de nêutrons são amplamente utilizadas para calibrar dispositivos sensíveis à campos de nêutrons, a falta de conhecimento do fator de anisotropia pode contribuir ainda mais para o aumento da incerteza de medições de laboratórios e indústrias que fazem uso de fontes de nêutrons. Essas variações podem estar relacionada à distribuição do material radioativo, ao próprio encapsulamento da fonte ou também ao sistema utilizado para posicionamento da fonte.

Em vista disso, um procedimento de medição que leve em consideração o fator de anisotropia de fontes de nêutrons contribuirá para a solução de alguns problemas, particularmente com relação às grandes incertezas associadas à dosimetria de nêutrons, beneficiando assim tanto os profissionais da área de radioproteção quanto aqueles que estão expostos aos campos de nêutrons, além de servir para ampliar os padrões de nêutrons no Laboratório de Metrologia de Nêutrons.

## REFERÊNCIAS

- [1] EISENHAUER, C. M., HUNT, J. B. and SCHWARTZ, R. B. **Calibration techniques for neutron personal dosimetry. Radiat. Prot. Dosim.** Vol.10 n°.1-4. Pag.43-57 (1978)
- [2] LN/LNMRI - Laboratório de Baixo Espalhamento. Disponível em <[http://ln.ird.gov.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=54&Itemid=53](http://ln.ird.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=54&Itemid=53)>, acessado em 20 de outubro de 2017
- [3] MASSAND, O. P. **Investigation of Some Properties of the Precision Long Counter. Commission of the European Communities.** CBNM, Luxembourg. pag. 6-7 60f. 1972.
- [4] BARDELL, A. G., BURKE, M., HUNT, J. B., TAGZIRIA, H. e THOMAS, D. J., **Anisotropy of Emission from Radionuclide Neutron Sources, NPL Report CIRM 24**, December (1998)
- [5] ISO 8529-1 - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Reference neutron radiation-part 1, characteristics and methods of production. ISO 8529-1** (Geneva: 150) (2001)

- [6] KOWATARI, M., ONUMA, I., TANIMURA, Y., KAWASAKI K., SAEGUSA, J. e YOSHIZAWA, M. **Determination of the Anisotropic Emission Factor for Neutrons from  $^{241}\text{Am}$ -Be Source.** *Radioisotopes. Vol. 57. N°9. 559-569(2008).*