

Aplicação da Teoria das Alometrias na elucidação e quantificação da capacidade das plantas em remover formaldeído de ambientes fechados.

William Roberto Luiz Silva Pereira

Bacharel e Licenciado em Ciências Biológicas pela Universidade Presbiteriana Mackenzie. Publicações científicas em Ecologia Teórica e Aplicada. Especialista em Matemática Aplicada à Biologia (Biomodelagem). Assessor técnico na Bio.Sensu.

Email: william_roberto_luiz@hotmail.com.

Resumo

A Síndrome do Edifício Doente vem chamando atenção da comunidade científica por gerar um quadro de sintomas que não possui uma causa única definida, porém já é apontado que grandes quantidades de COVs concentradas no ar de ambientes fechados podem estar causando a síndrome. Experimentos já demonstraram que diversas espécies cultivadas de plantas ornamentais possuem a capacidade de remover COVs com velocidades depurativas espécie-específica. Num experimento cuidadosamente elaborado, KIM et al. (2010) revelaram que a capacidade de remover formaldeído não depende apenas da espécie, mas também da

área foliar da planta. Ao re-analisar os dados disponibilizados nesse estudo, foi verificado que a área foliar total respeita relações alométricas com a biomassa total da planta, independente da espécie. Verificou-se também uma relação de escala que relacionada a capacidade de remover formaldeído com a área foliar total da planta, e por inferência, chegou-se a relação alométrica que relaciona a capacidade de remover formaldeído com a biomassa total. A inserção da teoria das alometrias no entendimento desse fenômeno leva a outras hipóteses e deduções até então não consideradas.

Palavras-chave: Alometria, Compostos Orgânicos Voláteis, Fitorremediação, Formaldeído, Relações de Escala, Síndrome do Edifício Doente.

Abstract

Sick Building Syndrome has been drawing the attention of scientific community by generating a variety of symptoms which don't have a unique origin. It has been already established otherwise that high quantities of VOCs indoors could induce the syndrome. Experiments have already showed that a great number of plant species are able to sequestered VOCs with specie-specific depurative velocities. However, in a carefully planned experiment, KIM et al. (2010) concluded that the purifying capacity in sequestering formaldehyde is not only specie-dependent, but depends of the leaf area. In re-analyzing data provided by this study, it was verified that total area leaf respects an allometric relationship with total biomass, independently from the species considered. A scaling relationship that relates formaldehyde sequestered with total area leaf, and by inference, an allometric scaling that relates the capacity of sequestering formaldehyde with total biomass. The insertion of Allometric Theory

in the understating of the phenomenon lead us to another hypothesis, not considered yet.

Key-words: Allometric Relations, Volatile Organic Compounds, Phytoremediation, Formaldehyde, Scaling Relationships, Sick Building Syndrome

Introdução

É apontado que os funcionários das empresas gastam entre 80-90% do tempo de trabalho em ambientes confinados todo dia e nesses ambientes a poluição do ar pode ser 10 vezes pior que fora. Atualmente os materiais, em particular, são na maioria feitos de colas sintéticas e resinas, enquanto equipamentos elétricos nos escritórios lançam centenas de tipos de compostos orgânicos voláteis (COVs) (CHEN et al., 2010). Eles levam as pessoas a se tornar menos e menos saudáveis, dando origem a “Síndrome do Edifício Doente”, definido pelo Comitê Técnico da Organização Mundial da Saúde por um conjunto de sintomas: dor de cabeça, fadiga, letargia, prurido e ardor nos olhos, irritação de nariz e garganta, anormalidades na pele e falta de concentração. Essa síndrome é na maioria das vezes associada à poluição do ar criada pelos edifícios no ambiente de trabalho.

Já é conhecido que alguns compostos orgânicos voláteis, como o formaldeído, entram nas folhas através dos estômatos e das cutículas e é mais rapidamente absorvida pela superfície abaxial e por plantas jovens (KIM et al., 2008 e 2010). Uma vez absorvida pelas folhas, geralmente entram no ciclo de Calvin depois da oxidação enzimática do CO₂. Sintetizado, esse COV é retirado do ambiente, metabolizado e incorporado pelas plantas.

As folhas, junto com o caule, correspondem à boa parte da biomassa desenvolvida pela planta (biomassa da parte aérea, shoot mass), e outra parcela é incorporada nas raízes (biomassa radicular, root mass). Uma série de variáveis fisiológicas e ecológicas co-variam com a biomassa da planta (ENQUIST, 2002; NIKLAS, 2004; ENQUIST et al., 2007; PRICE et al., 2007), levando ao surgimento de relações alométricas próprias com coeficientes e expoentes específicos, possibilitando a quantificação e entendimento dos fenômenos relacionados (PEREIRA, 2013).

KIM et al. (2010) elaboraram um experimento onde foi injetado numa câmara fechada uma dose inicial de 2 $\mu\text{L/L}$ (dose aproximadamente 12 vezes mais elevada em comparação aos valores encontrados em residências novas na Coreia) de formaldeído para testar a eficiência em remover esse gás para 85 espécies de plantas ornamentais, com mensurações com intervalo de tempo de 1h, durante 5 horas. Todas as espécies retiraram o formaldeído com velocidades diferenciadas. No entanto foi verificado que a capacidade depurativa não dependeu apenas da espécie, mas também da área foliar total da planta contida na câmara.

O objetivo desse trabalho é adaptar os resultados do trabalho de KIM et al. (2010) na Teoria das Alometrias e fornecer equações alométricas para quantificar a capacidade de remover formaldeído pelas plantas, não em função da área foliar aplicada na câmara, e sim da área foliar total da espécie no vaso.

Metodologia

Foram disponibilizados dados (KIM *et al.*, 2010) para a altura da planta (cm/vaso), área total de folhas por vaso (cm^2/vaso) e o peso fresco total da planta por vaso

PEREIRA, William Roberto Luiz Silva. APLICAÇÃO DA TEORIA DAS ALOMETRIAS NA ELUCIDAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DA CAPACIDADE DAS PLANTAS EM REMOVER FORMALDEÍDO DE AMBIENTES FECHADOS. *RevInter Revista Intertox de Toxicologia, Risco Ambiental e Sociedade*, v. 6, n. 3, p. 30-46, Out. 2013.

(g/vaso) para 85 espécies de plantas ornamentais, com seus respectivos desvios-padrões (três amostras de plantas por espécie). As plantas foram agrupadas em cinco categorias (plantas de folhagem lenhosas, com 20 espécies representantes; plantas de folhagem herbáceas, com 20 espécies; plantas nativas da Coréia, 20 espécies; samambaias, 20 espécies; e ervas, 5 espécies).

A quantidade de formaldeído removido a partir de uma concentração inicial de 2 $\mu\text{L/L}$ injetado na câmara foi monitorado hora em hora durante cinco horas e a quantidade de formaldeído removido foi apresentado em $\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3 \text{cm}^2}$ de área foliar através de um método de quantificação próprio (KIM *et al.*, 2008).

Uma relação de escala ocorre quando pode ser descrita através de uma lei de potência na forma $y = ax^b$ e uma relação alométrica surge quando uma dada variável é função da biomassa, descrita por $y = am^b$. O grau de ajuste aos dados (máximo quando $R^2 = 1$) é uma das maneiras de determinar o quão ambas as variáveis correlacionam, mas não é o suficiente para certificar que a correlação é realmente é uma alometria, principalmente quando R^2 revela valores muito baixos. Nesse estudo consideraremos como hipótese a existência de uma relação alométrica potencial quando $R^2 \geq 0,5$.

Com isso foram testadas relações alométricas inter-específicas para :

- Altura da planta (H_p) em função da massa fresca média (\bar{M}) $\rightarrow H_p = a\bar{M}_T^b$
- Área foliar total (A_T) em função da massa fresca média (\bar{M}) $\rightarrow A_T = a\bar{M}_T^b$

E relações de escala para:

- Formaldeído removido por espécie (F_E) ao longo do tempo de exposição (h) \rightarrow
$$F_E = ah^b$$
- Formaldeído removido após 5 horas de exposição (F_R) em função da área total média (A_T) $\rightarrow F_R = a\bar{A}_T^b$

(Nota: os termos ‘massa fresca média’ e ‘biomassa total média’ são equivalentes, porém o primeiro é mais aplicado as ciências hortícolas e o segundo no campo das alometrias).

Resultados

Surgiram relações alométricas entre a altura da planta e a área total de folhas, ambas em função da massa fresca total (ou biomassa total) dentro das categorias. Para as relações entre a altura e biomassa total, apenas o grupo das samambaias apresentou $R^2 \geq 0,5$ (Figura 1) No entanto, para a área total de folhas em função da biomassa, todas as categorias (menos ervas) apresentaram relações alométricas com $R^2 \geq 0,5$ (Figura 3).

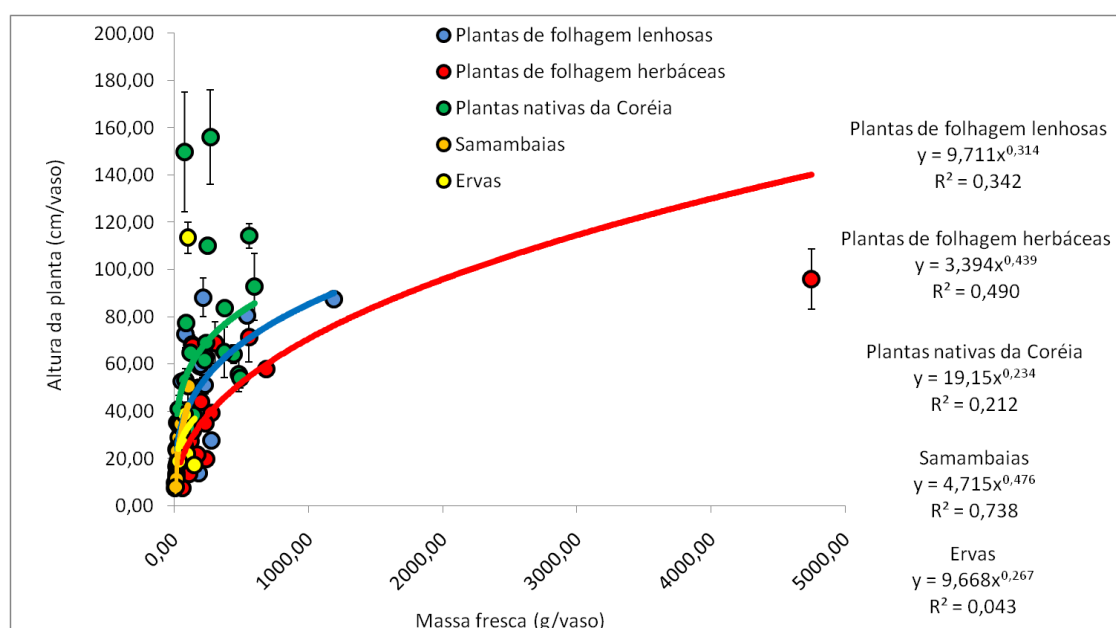


Figura 1. Ajuste de leis de potência ($y = ax^b$) da altura da planta (cm/vaso) em função da massa fresca total da planta (g/vaso) para as cinco categorias de plantas

ornamentais classificadas por KIM *et al.* (2010). À direita são descritas as fórmulas com seus respectivos coeficientes de terminação (R^2).

Na categoria das plantas de folhagem herbáceas KIM *et al.* (2010) incluíram a palmeira-areca (*Chrysalidocarpus lutescens*), porém essa espécie pertence a família Arecaceae e os representantes dessa família são de espécies lenhosas. Tendo isso, foram realizadas novas plotagens excluindo esse dado. Além do mais, isso fez com que a dispersão dos dados fossem melhor visualizadas (Figura 2).

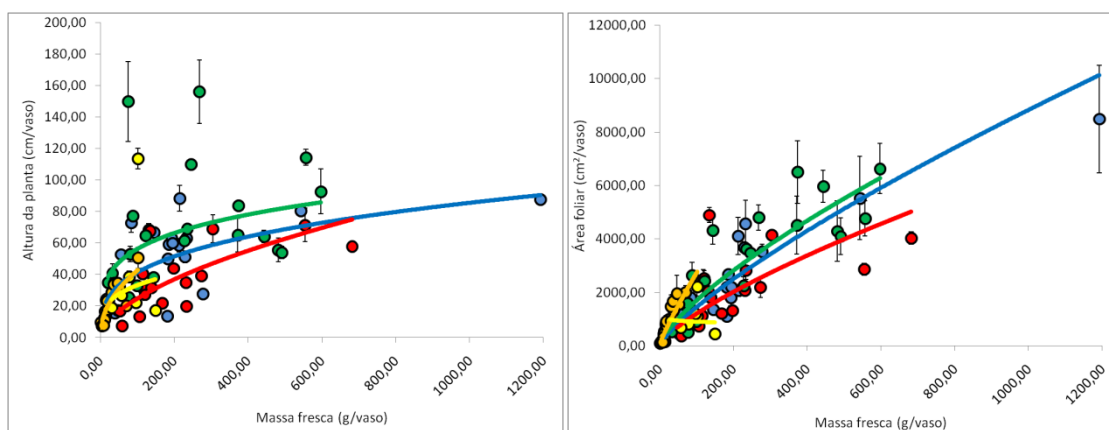


Figura 2. Gráficos da mesma plotagem realizada na figura 1, sem os dados para *Chrysalidocarpus lutescens*.

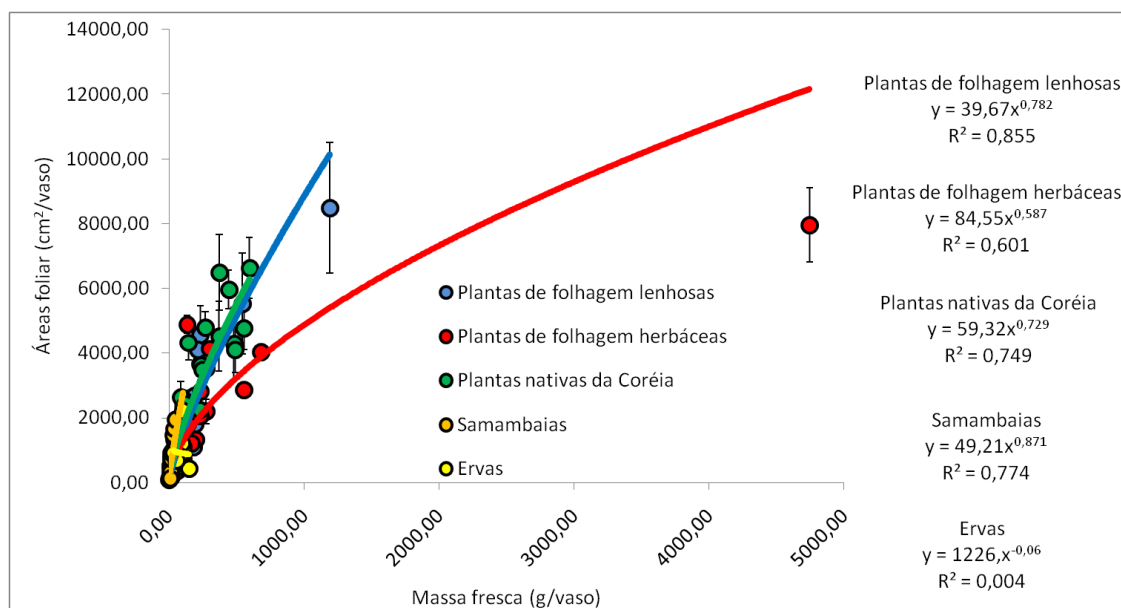


Figura 3. Ajuste de leis de potência ($y = ax^b$) da área foliar (cm^2/vaso) em função da biomassa total da planta (g/vaso) para as cinco categorias de plantas ornamentais classificadas por KIM *et al.* (2010). À direita são descritas as fórmulas com seus respectivos coeficientes de terminação (R^2).

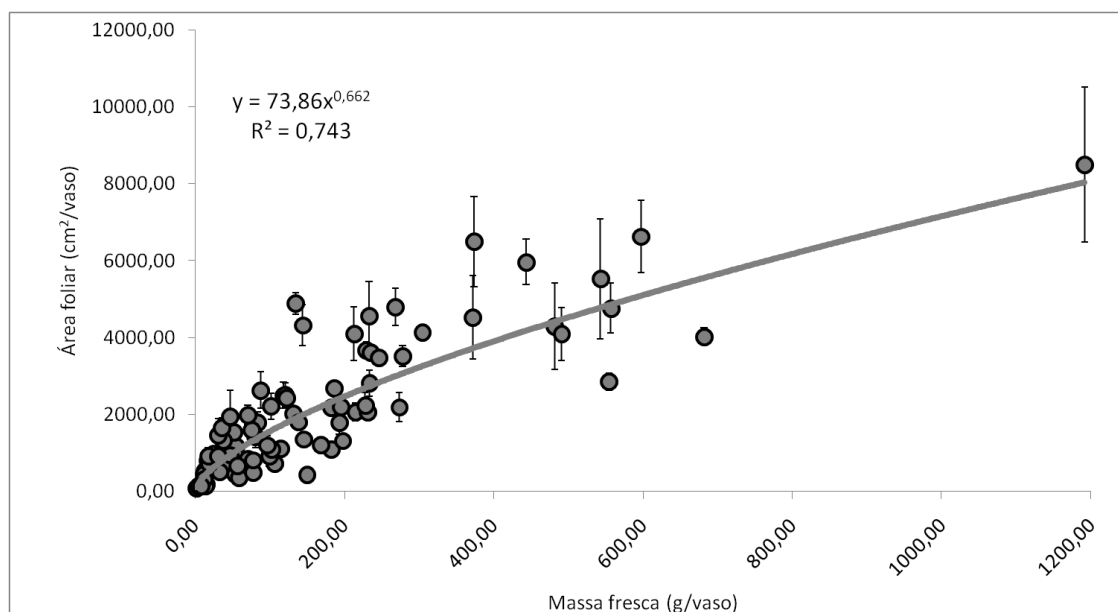


Figura 4. Ajuste da lei de potência ($y = ax^b$) da área foliar (cm^2/vaso) em função da biomassa total da planta (g/vaso) para as 85 espécies de plantas ornamentais avaliadas por KIM *et al.* (2010).

Ao considerar todos os dados para as 85 espécies de plantas ornamentais, o ajuste da lei de potência aos dados forneceu uma boa aderência (Figura 4), informando que essa relação não é táxon-específica.

Todos os dados disponibilizados para a quantidade de formaldeído removido por espécie ao longo do tempo (total de 5 horas de exposição) respeitaram relações de escala com $R^2 \geq 0,5$. Foi apresentada uma curva média com os desvios observados e a curva da espécie mais eficiente (samambaia-real-japonesa, *Osmunda japonica*) e a menos eficiente (dracena-de-faixa, *Dracaena deremensis* 'Warneckii') (Figura 5).

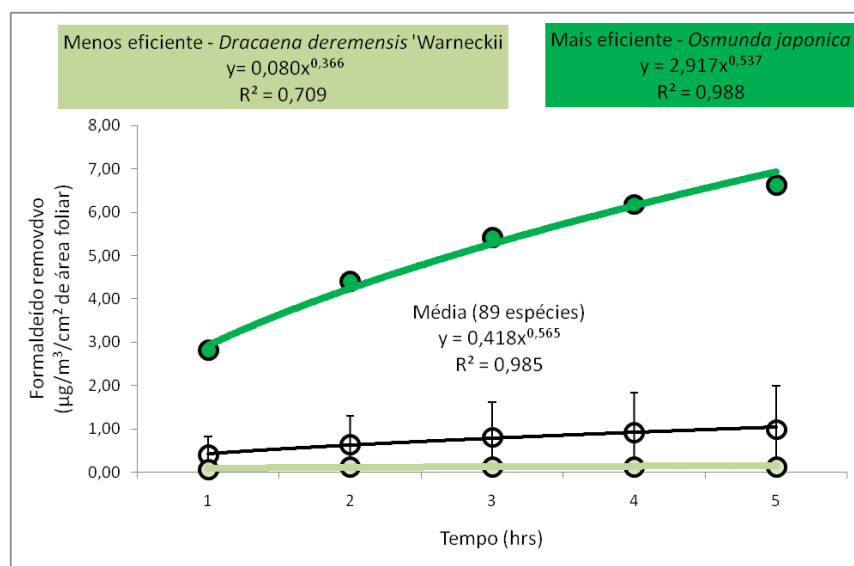


Figura 5. Monitoramento da quantidade de formaldeído removido ($\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{cm}^2$ de área foliar) ao longo de cinco horas de exposição. As leis de potência são descritas para a espécie mais eficiente em remover formaldeído (*Osmunda japonica*), a menos eficiente (*Dracaena deremensis* 'Warneckii') e para os valores médios das 85 espécies monitoradas por KIM *et al.* (2010), com suas respectivas barras de desvio.

Ao relacionar a quantidade de formaldeído removido em função da área foliar total em cada categoria de plantas, todas as relações alométricas revelaram expoentes negativos (Figura 6) e apenas o grupo das samambaias apresentou $R^2 \geq 0,5$ ($R^2 = 0,836$). No entanto, ao desconsiderar as variações inter-categorias, ou seja, plotando todos os dados para as 85 espécies ao mesmo tempo, surgiu uma relação de escala com $R^2 \geq 0,5$ e, de fato, o grupo das samambaias contribuiu com o aumento da significância dessa relação (Figura 7).

Uma observação visual das curvas ajustadas revela que existe uma tendência da quantidade de formaldeído removido (por cm^2 de área foliar x cm^3 de volume de confinamento) decair com o aumento da área foliar total, independente da espécie

ou da categoria considerada (Figura 7). KIM *et al.* (2010) geraram um gráfico semelhante (figura 4 do artigo) onde também houve um decaimento da quantidade removida de formaldeído, mas em função da área total de folhas confinadas na câmara. Na mesma figura foi apresentado um ajuste linear aos dados, porém a dispersão dos pontos se assemelhou mais a uma lei de potência. O grupo discutiu esse resultado muito brevemente, sem grandes considerações.

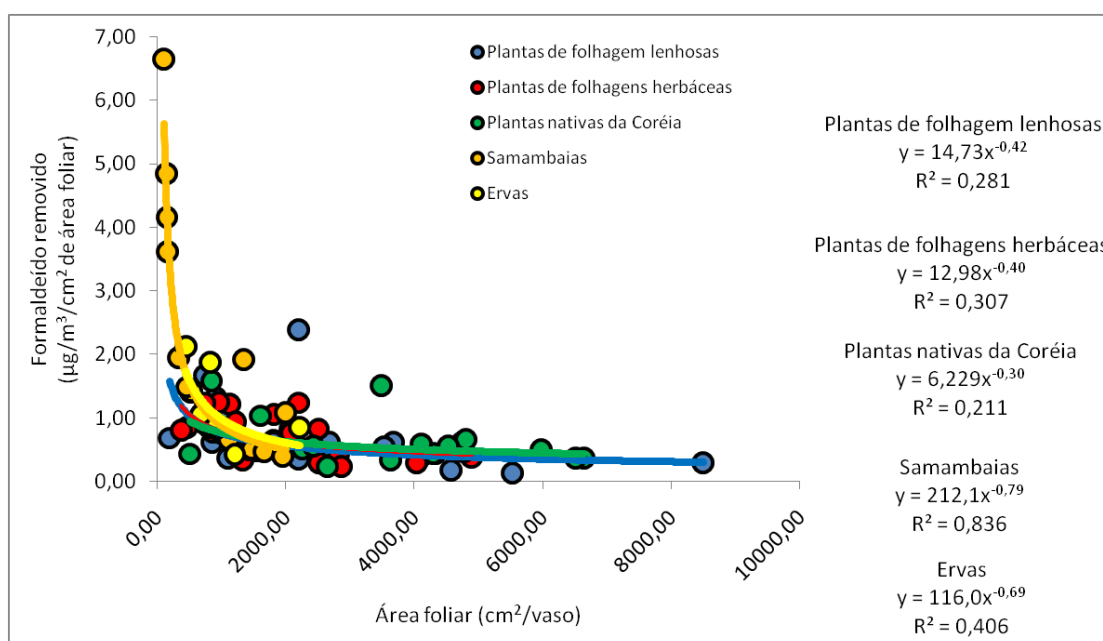


Figura 6. Ajuste de leis de potência ($y = ax^b$) da quantidade de formaldeído removido ($\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{cm}^2$ de área foliar) em função da área foliar total (cm^2/vaso) para as cinco categorias de plantas ornamentais classificadas por KIM *et al.* (2010). Na direita são descritas as fórmulas com seus respectivos coeficientes de terminação (R^2).

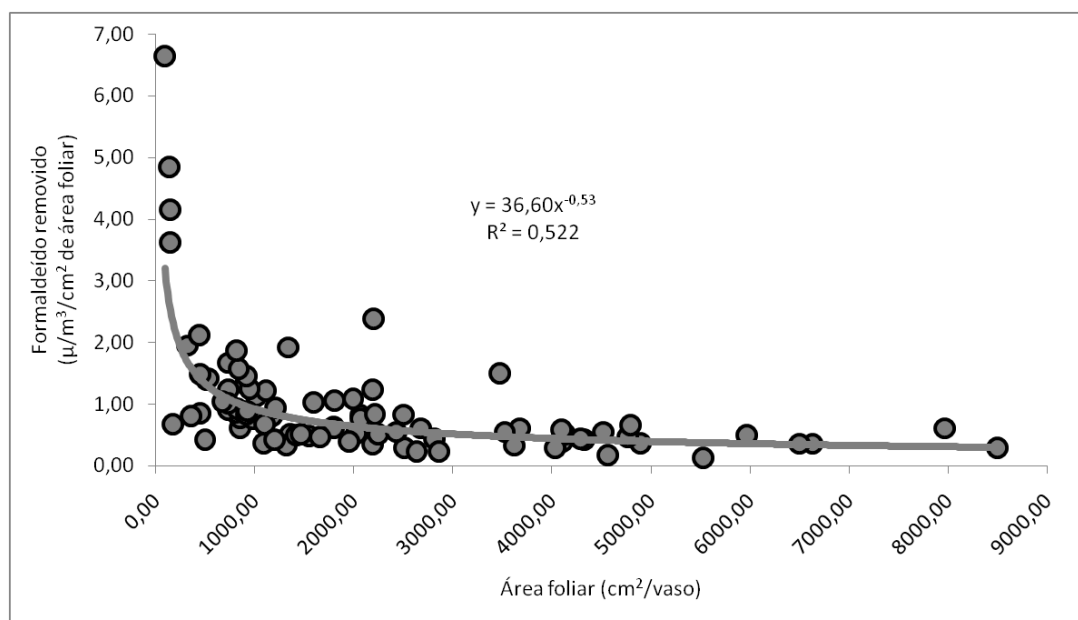


Figura 7. Ajuste de leis de potência ($y = ax^b$) da quantidade de formaldeído removido ($\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{cm}^2$ de área foliar) em função da área foliar total (cm^2/vaso) para as 85 espécies de plantas ornamentais avaliadas por KIM *et al.* (2010). No centro do gráfico segue a fórmula com seu respectivo coeficiente de terminação (R^2).

Discussão

Além de ajudar a entender a relação entre diferentes fenômenos, a Teoria das Alometrias permite que sejam realizadas quantificações com relativa facilidade. As leis de potência aplicadas na relação entre a altura da planta e a biomassa total não revelaram ajustes satisfatórios e isso não era esperado, já que tal alometria é reconhecida (PRICE *et al.*, 2007) e teoricamente revela um expoente de 0,25.

O aparecimento de relações alométricas significativas entre a área foliar total e a biomassa total ($A_T \propto \overline{M_T}^b$) em todas as categorias (menos ervas, provavelmente

pela quantidade pequena de dados) e a relação de escala inter-categorias entre a quantidade de formaldeído removido e a área foliar total ($F_R \propto \overline{A_T}^{(-b)}$) guardam uma co-variação interessante.

Uma variação na biomassa total afeta alometricamente a área foliar total e conseqüentemente uma mudança na área foliar total afeta alometricamente a quantidade de formaldeído removido pela planta. Com isso pode-se introduzir a relação $F_R \propto \overline{M_T}^{(-b)}$, que informa que uma alteração na biomassa total irá afetar alometricamente a quantidade de formaldeído removido e isso é condicionado por valores específicos para o expoente.

A biomassa vegetal também é função da taxa metabólica basal (ENQUIST *et al.*, 2007; PRICE *et al.*, 2007), descrita pela lei de Rubner (se $b = 2/3$) ou Kleiber (se $b = 3/4$) (PEREIRA, 2013) ou outro valor para o expoente, regida por $B \propto \overline{M_T}^{(b)}$. A taxa metabólica é a taxa fundamental responsável pela atividade bioquímica dos organismos em transformar os recursos capturados em energia e alocar em biomassa (ENQUIST *et al.*, 2007). Um leve aumento nos valores do expoente metabólico leva a um aumento da biomassa incorporada, decorrente de uma maior eficiência na atividade metabólica, e conseqüentemente leva a um aumento da área foliar total.

A área de superfície fotossintética (A_p) co-varia com vários outros tratos vegetais (assimilação de carbono, fotossíntese bruta, taxa de fluxo de seiva no caule, número de folhas e massa de folhas). Essa inter-dependência foi apresentada por ENQUIST *et al.* (2007) da seguinte forma:

$$R \propto P \propto Q_0 \propto n_L \propto M_L \propto A_p \propto M^\theta$$

sendo que o valor de θ é derivado a partir de premissas geométricas das redes vasculares, dinâmicas e biomecânicas. Os parâmetros que controlam o surgimento de θ são caracterizados por fatores relacionados à estrutura e geometria das redes de distribuição de recursos (sistema vascular das plantas). Esse parâmetro é maximizado quando $\theta = \frac{3}{4} = 0,75$ e surge quando a rede de ramificação preenche

PEREIRA, William Roberto Luiz Silva. APLICAÇÃO DA TEORIA DAS ALOMETRIAS NA ELUCIDAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DA CAPACIDADE DAS PLANTAS EM REMOVER FORMALDEÍDO DE AMBIENTES FECHADOS. *RevInter Revista Intertox de Toxicologia, Risco Ambiental e Sociedade*, v. 6, n. 3, p. 30-46, Out. 2013.

todo o volume, a resistência hidrodinâmica é minimizada, os ramos terminais são independentes da massa e as adaptações biomecânicas negam os efeitos da gravidade (ENQUIST *et al.*, 2007). Com isso pode-se afirmar que a área superficial fotossintética é maximizada quando $A_p \propto M^{3/4}$. O mesmo é afirmado para a área foliar total: $A_T \propto M^{3/4}$ (ENQUIST, 2002). Os resultados nesse estudo revelaram um expoente de $0,662 \approx 2/3 = 0,6\bar{7}$, ou seja, não está maximizado e respeita valores relacionados a geometria Euclidiana (ENQUIST *et al.*, 2007).

Supondo que haja um acréscimo de biomassa e da área foliar (condicionado pelo aumento do expoente), isso levaria a um efeito negativo sobre o expoente da alometria que determina a capacidade da planta em remover formaldeído, se a relação alométrica $F_R \propto \overline{M_T}^{(-b)}$ for verdadeira e co-variarem com os demais tratamentos indicados acima.

As samambaias foram as plantas que melhor removeram formaldeído (KIM *et al.*, 2010) e contribuiu definitivamente para o surgimento de $F_R \propto \overline{A_T}^{(-b)}$ com $R^2 \geq 0,5$. Esse fato faz com que essa relação alométrica tenha sua existência minimamente confirmada com valor de $R^2 \approx 0,5$.

Pela figura 5 podemos conferir que a média da quantidade de formaldeído removido para as 85 espécies de plantas depois de cinco horas de exposição ficaram concentradas em torno de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{cm}^2$ de área foliar e essa mesma tendência surgiu no gráfico da figura 6 e 7. Isso confirma que a grande maioria das espécies analisadas atingem um grau de saturação na sua capacidade de remoção em torno de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{cm}^2$ de área foliar e poucas espécies (principalmente as samambaias) saturam em valores superiores.

Ao expor quatro espécies de folhagem em ambiente confinado concentrado de benzeno, tolueno e dos dois gases misturados por seis horas, YOO *et al.* (2006) verificaram um efeito deletério desses COVs sobre a taxa fotossintética, responsável pelo metabolismo básico da planta, e em outras variáveis relacionadas (taxa de respiração, condutância estomatal, concentração de CO_2 intercelular e taxa de transpiração) indicando haver uma relação entre a habilidade de remover um

composto volátil e mudanças fisiológicas indesejáveis nas plantas. Esse resultado confirma a existência da relação alométrica proposta, já que a incorporação de biomassa depende da taxa de fotossíntese, que depende da quantidade de carbono seqüestrado e disponibilizado para realização das reações bioquímicas de incorporação de biomassa. O aumento da concentração de COVs no interior das folhas leva a um efeito supressor na taxa fotossintética e, conseqüentemente, no metabolismo e na incorporação de biomassa na planta.

As samambaias possuem xilema e floema, são vasculares, mas pela filogenia das plantas vasculares as samambaias são mais antigas (divisão Pteridophyta) quando comparadas com as plantas que produzem flores (divisão Spermatophyta). Em termos evolutivos, é afirmado que ao longo do tempo houve uma série de incrementos sucessivos na complexidade do sistema vascular, desde as simples briófitas passando pelas plantas produtoras de esporos, plantas mais complexas produtoras de sementes até angiospermas (PRYER *et al.*, 2004). Uma complexidade mais inferior no sistema vascular das samambaias pode estar contribuindo para o aumento na eficiência em remover formaldeído, já que isso pode ter um efeito direto no expoente metabólico desse grupo, não maximizado, levando a uma menor capacidade fotossintética e a uma maior capacidade em seqüestrar formaldeído.

Outros estudos verificaram que as plantas são capazes de remover COVs: ozônio (PAPINCHAK *et al.*, 2009), benzeno, tolueno, octano, tricloroetileno, α -pineno, (YANG *et al.*, 2009), formaldeído, xileno e amônia (WOLVERTON & WOLVERTON, 1993) e no ar interior de ambientes muito urbanizados é quase certos que todos estão presentes ao mesmo tempo, em maior ou menor concentração, aumentando ainda mais os efeitos fisiológicos deletério nas reações bioquímicas que surtem efeitos metabólicos e fisiológicos nas plantas.

Referências bibliográficas

PEREIRA, William Roberto Luiz Silva. APLICAÇÃO DA TEORIA DAS ALOMETRIAS NA ELUCIDAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DA CAPACIDADE DAS PLANTAS EM REMOVER FORMALDEÍDO DE AMBIENTES FECHADOS. *RevInter Revista Intertox de Toxicologia, Risco Ambiental e Sociedade*, v. 6, n. 3, p. 30-46, Out. 2013.

CHEN, H-S et al. Applying DEA and Taguchi methods in plant selection and optimal layout to increase commerce management environment quality. **African Journal of Business Management**, v. 4(18), p. 4079-4085, 2010.

ENQUIST, B. J. Universal scaling in tree and vascular plant allometry: toward a general quantitative theory linking plant form and function from cells to ecosystems. **Tree Physiology**, v. 22, p. 1045-1064, 2002.

ENQUIST, B. J.; TIFFNEY, B. H. & NIKLAS, K. J. Metabolism scaling and the evolutionary dynamics of plant size, form, and diversity: towards a synthesis of ecology, evolution, and paleontology. **Internationa Journal of Plant Science**, v. 168(5), p. 729-749, 2007.

KIM, K. J. et al. Efficiency of volatile formaldehyde removal by indoor plants: contribution of aerial plant parts versus the root zone. **Journal of the American Society of Horticultural Science**, vol. 133(4), p. 521-526, 2008.

KIM, K. J. et al. Variation in formaldehyde removal efficiency among indoor plant species. **Hortscience**, v. 45(10), p. 1489-1495, 2010.

NIKLAS, K. J. Plant allometry: is there a grand unifying theory? **Biological Reviews**, v. 79, p. 871-889, 2004.

PAPINCHAK, H. L. et al. Effectiveness of houseplants in reducing the indoor air pollutant ozone. **HortTechnology**, v. 19, p. 286-290, 2009.

PEREIRA, W. R. L. S. Alometrias em toda parte. **Revinter**, v. 6(1), p. 78-101, 2013.

PRICE, C. A.; ENQUIST, B. J. & SAVAGE, V. M. A general model for allometric covariation in botanical form and function. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 104(32), p. 13204-13209, 2007.

PRYER, K. M. et al. Phylogeny and evolution of ferns (Monilophytes) with a focus on the early Leptosporangiate divergences. **American Journal of Botany**, v. 91(10), p. 1582-1598, 2004.

PEREIRA, William Roberto Luiz Silva. APLICAÇÃO DA TEORIA DAS ALOMETRIAS NA ELUCIDAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DA CAPACIDADE DAS PLANTAS EM REMOVER FORMALDEÍDO DE AMBIENTES FECHADOS. **RevInter Revista Intertox de Toxicologia, Risco Ambiental e Sociedade**, v. 6, n. 3, p. 30-46, Out. 2013.

WOLVETON, B. C. & WOLVERTON, J. D. Plants and soil microorganisms: removal of formaldehyde, xylene, and ammonia from the Indoor Environment. **Journal of the Mississippi Academy of Sciences**, v. 38(2), p. 11-15, 1993.

YANG, D. S. et al. Screening indoor plants for volatile organic pollutant removal efficiency. **HortScience**, v. 44, p. 1377-1381, 2009.

YOO, M. et al. Efficacy of indoor plants for the removal of single and mixed volatile organic pollutants and physiological effects of the volatiles on the plants. **Journal of the American Society of Horticultural Science**, v. 131(4), 452-458, 2006.

ZHOU, J. et al. Purification of formaldehyde-polluted air by indoor plants of Araceae, Agavaceae and Liliaceae. **Journal of Food, Agriculture & Environment**, v. 9(3&4), 1012-1018, 2011.