

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**CONSTANTES DE VIABILIDADE PARA SEMENTES DE
FEIJOEIRO DOS CULTIVARES TIBATÃ E UNA**

FABIANA GONÇALVES FRANCISCO
ENGENHEIRA AGRÔNOMA, MSc.

CAMPINAS, SP

FEVEREIRO DE 2006

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**CONSTANTES DE VIABILIDADE PARA SEMENTES DE
FEIJOEIRO DOS CULTIVARES TIBATÃ E UNA**

Tese de Doutorado submetida à banca examinadora
para obtenção do título de Doutor em Engenharia
Agrícola na área de concentração de Tecnologia Pós-
Colheita.

FABIANA GONÇALVES FRANCISCO

Orientador: Prof. Dr. Roberto Usberti

CAMPINAS, SP

FEVEREIRO DE 2006

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

F847c Francisco, Fabiana Gonçalves
Constantes de viabilidade para sementes de feijoeiro
dos cultivares Tibatã e Una / Fabiana Gonçalves
Francisco.--Campinas, SP: [s.n.], 2006.

Orientador: Roberto Usberti
Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Feijão comum. 2. Sementes - Deterioração. 3.
Feijão comum – Sementes - Armazenamento. 4. Feijão
comum – Sementes – Viabilidade. 5. Tecnologia de
sementes. 6. Secagem. 7. Hidratação. I. Usberti,
Roberto. II. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.

Titulo em Inglês: Viability equation constants for two *Phaseolus vulgaris* cultivars

Palavras-chave em Inglês: *Phaseolus vulgaris*, Controlled deterioration, Hermetic
storage, Seed longevity

Área de concentração: Tecnologia Pós-Colheita

Titulação: Doutora em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: Rubens Sader, José Tadeu Jorge, Leila Martins, Ivany Ferraz
Marques Válio

Data da defesa: 17/02/2006

DEDICATÓRIA

*À DEUS,
A meus pais MÁRIO e IVETE,
Ao meu marido ALEXANDRE,
pelo apoio, carinho e incentivo para vencer os desafios.*

AGRADECIMENTOS

- A todos que direta ou indiretamente contribuem em todas as formas com o meu eterno aprendizado de vida;
- A Universidade Estadual de Campinas e a Faculdade de Engenharia Agrícola, em especial ao Departamento de Tecnologia Pós-Colheita, pelo treinamento proporcionado;
- Ao meu orientador Dr. Roberto Usberti pelos ensinamentos, orientação e confiança em mim depositada;
- Aos membros da Comissão Examinadora, Prof. Rubens Sader, Prof. José Jorge Tadeu, Dra. Leila Martins, Prof. Ivany Ferraz Marques Válio e Prof. João Domingos Biagi;
- A Ana Paula Montagner, Rosângela Gomes e Marta Vechi pela amizade e suporte junto a Secretaria de Pós-Graduação;
- À minha família, cunhadas, e sogros que sempre me apoiaram;
- A EBDA (Empresa Baiana de Desenvolvimento Agropecuário) pela disponibilidade de suas instalações no Laboratório Central, e em especial aos funcionários do Laboratório, pela ajuda nos trabalhos, pela simpatia e agradável convivência;
- Às amigas Luciana, Jussara, Rosa e Juliana pela amizade e ajuda prestada;
- A FAPESP pela concessão da bolsa de doutorado.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iv
INDICE DE TABELAS	vi
INDICE DE FIGURAS	vii
RESUMO.....	ix
ABSTRACT	x
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVO	2
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
3.1 Longevidade de sementes	3
3.2 Qualidade das sementes após o processo de secagem	4
3.3 Comportamento das sementes durante o armazenamento	5
3.4 A equação de longevidade	6
3.5 Atividade de água (A_w).....	9
3.5.1 Modelo de BET (Brunauer, Emmet e Teller).....	11
3.5.2 Modelo de GAB (Gugghenheim, Anderson e de Boer)	11
3.5.3 Modelo de HALSEY.....	12
3.5.4 Modelo de OSWIN	13
3.5.5 Modelo de PELEG	13
3.5.6 Modelo de HENDERSON	13
3.5.7 Modelo CHUNG e PFOST	14
3.6 Equilíbrio higroscópico	14
3.7 Equilíbrio higroscópico e temperatura.....	15
3.8 Efeito histerese	15
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	17
4.1 Material.....	17
4.2 Métodos	17
4.2.1 Determinação do grau de umidade das sementes	17
4.2.2 Acondicionamento e armazenamento das sementes	18
4.2.3 Germinação	19
4.2.4 Determinação de atividade de água.....	20
4.2.5 Armazenamento	20
4.2.6 Delineamento estatístico	21
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	23
5.1 Secagem das sementes	23
5.2 Grau de umidade da semente e a umidade relativa de equilíbrio.....	25
5.3 Isotermas.....	25
5.4 Curvas de sobrevivência	30
5.4.1 Curvas de sobrevivência a 40°C	30
5.4.1 Curvas de sobrevivência a 50°C	31
5.4.3 Curvas de sobrevivência a 65°C	33
5.5 Constantes de viabilidade para os cultivares.....	35
6. CONCLUSÕES.....	42
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43

INDICE DE TABELAS

N°		Página
1	Períodos de secagem necessários para atingir os níveis desejados de umidade (% base úmida), para os cultivares de feijoeiro Tibatã e Una, a partir dos valores iniciais de grau de umidade.	18
2	Períodos de reidratação necessários para atingir os níveis desejados de umidade (% base úmida), para os cultivares de feijoeiro Tibatã e Una, a partir dos valores iniciais de grau de umidade.	18
3	Grau de umidade de sementes dos cultivares Una e Tibatã de <i>Phaseolus vulgaris</i> , armazenadas a 40, 50 e 65°C.	21
4	Resultados médios de germinação (G, %) de sementes de cultivares de <i>Phaseolus vulgaris</i> em diferentes graus de umidade (GU, %, base úmida), após desidratação em dessecadores com sílica gel. P = germinação em probit; * grau de umidade inicial.	24
5	Grau de umidade (U, %) e atividade de água (A_w) para os cultivares de feijoeiro Tibatã (Carioca) e Una (Preto).	25
6	Estimativas dos parâmetros dos modelos empíricos.	28
7	Análise estatística de sementes de <i>Phaseolus vulgaris</i> do cultivar Tibatã, armazenadas a 40, 50 e 65°C, após todas as curvas de deterioração terem sido direcionadas para o mesmo ponto de origem (K_i). GU = grau de umidade; ** = diferença significativa; ns = sem diferença significativa a $p < 0,01$.	36
8	Análise estatística de sementes de <i>Phaseolus vulgaris</i> do cultivar Una, armazenadas a 40, 50 e 65°C, após todas as curvas de deterioração terem sido direcionadas para o mesmo ponto de origem (K_i). GU = grau de umidade; ** = diferença significativa; ns = sem diferença significativa a $p < 0,01$.	37
9	Análise de variância de todos os sigmas para sementes do cultivar Tibatã após análise estatística e adequações.	38
10	Análise de variância de todos os sigmas para sementes do cultivar Una após análise estatística e adequações.	38
11	Valores das constantes de viabilidade K_E , C_w , C_H e C_Q determinadas para sementes de Tibatã e Una.	39

INDICE DE FIGURAS

N°		Página
1	Gráfico mostrando o efeito histerese	16
2	Taxa de secagem de sementes dos cultivares Tibatã e Una, em sílica a 25°C.	23
3	Isotermas de sorção e desorção, obtidas a 25°C para sementes dos cultivares Tibatã e Una.	27
4	Modelo de Oswin ajustado aos valores experimentais para Tibatã.	29
5	Modelo de Peleg ajustado aos valores experimentais para Una.	29
6	Germinação de sementes de feijoeiro do cultivar Tibatã armazenadas a 40°C e com graus de umidade de 6,9; 8,3; 12,9; 14,2; 15,9 e 17,2%.	31
7	Germinação de sementes de feijoeiro do cultivar Una armazenadas a 40°C e com graus de umidade de 7,2; 8,3; 11,0; 12,5; 13,4 e 16,6%.	31
8	Germinação de sementes de feijoeiro do cultivar Tibatã armazenadas a 50°C e com graus de umidade de 6,9; 8,3; 12,9; 14,2; 15,9 e 17,2%.	32
9	Germinação de sementes de feijoeiro do cultivar Una armazenadas a 50°C e com graus de umidade de 7,2; 8,3; 11,0; 12,5; 13,4 e 16,6%.	33
10	Germinação de sementes de feijoeiro do cultivar Tibatã armazenadas a 65°C e com graus de umidade de 3,3; 6,9; 8,5; 9,7; 13,6 e 16,7%.	34
11	Germinação de sementes de feijoeiro do cultivar Una armazenadas a 65°C e com graus de umidade de 3,1; 5,4; 7,2; 9,8; 13,4 e 17,3%.	35
12	Relação logarítmica entre o grau de umidade (% base úmida) e o desvio padrão da distribuição de freqüência das sementes mortas no tempo (sigma) para os cultivares Tibatã (A) e Una (B) em armazenamento hermético a 40, 50 e 65°C.	40

Constantes de viabilidade para sementes de feijoeiro dos cultivares Tibatã e Una. Campinas, 2006. Tese. (Doutorado em Engenharia Agrícola, Área de Concentração Tecnologia Pós-Colheita) - Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI/UNICAMP).

Autor: Fabiana Gonçalves Francisco

Orientador: Prof. Dr. Roberto Usberti

RESUMO

O conhecimento do comportamento das sementes em relação às condições de armazenamento a que são submetidas é de extrema importância para a avaliação de sua armazenabilidade. Este experimento analisou o armazenamento de sementes de *Phaseolus vulgaris* visando a obtenção das constantes da equação de viabilidade para dois cultivares, para a sua conservação e para garantir a sua disponibilidade. As sementes de feijoeiro foram reidratadas com água e/ou secas em sílica gel, ambas a 25°C, a partir dos seus valores iniciais até a obtenção dos valores de umidade desejados. Amostras de sementes com graus de umidade para os cultivares Tibatã e Una (3,28 a 16,65 e 3,14 a 17,26, com valores iniciais de 13,61 e 12,35%, respectivamente) foram acondicionadas em embalagens de alumínio termo soldadas e armazenadas a 40, 50 e 65°C até a obtenção de curvas completas de deterioração. As análises estatísticas foram realizadas pelo programa “Glim”. Dois grupos de constantes foram obtidos para prever a longevidade de sementes dos cultivares Tibatã e Una, a saber: $K_E = 5,759; 4,556$; $C_W = 4,598; 5,209$; $C_H = 0,0451; 0,1213$; $C_Q = 0,001014; 0,001764$, respectivamente. Foi observada uma relação inversa entre o grau de umidade e a longevidade das sementes. O limite inferior calculado para aplicação da equação para os dois cultivares de *Phaseolus vulgaris* a 65°C situa-se ao redor de 4,52 e 6,15% para Tibatã e Una, respectivamente em equilíbrio com valores de UR ao redor de 20%.

PALAVRAS-CHAVE: *Phaseolus vulgaris*, deterioração controlada, armazenamento hermético, longevidade de sementes.

Viability equation constants for two *Phaseolus vulgaris* cultivars

ABSTRACT

The previous knowledge of seed performance during storage is important to evaluate its storability. This experiment analysed *Phaseolus vulgaris* seed storage aiming to get viability equation constants for two cultivars, as to guarantee seed disposal and conservation. Seeds were rehydrated over water or dried over silica gel, both at 25°C, from the initial moisture contents, until achieved desired mc values. Seed samples with mc ranging from 3.28 to 16.65 and 3.14 to 17.26 (Tibatã and Una), with initial mc of 13.61 and 12.35%, respectively, were then placed in aluminium foil packets and stored at 40, 50 e 65°C until obtaining complete survival curves. Statistical analysis was performed through Glim software. Two different groups of constants were calculated as to predict seed longevity of Tibatã and Una cultivar, as follows: $K_E = 5.759; 4.556$; $C_W = 4.598; 5.209$; $C_H = 0.0451; 0.1213$; $C_Q = 0.001014; 0.001764$, respectively. An inverse relationship was observed between moisture content and seed longevity. The lower limit for viability equation application at 65°C for the cultivars Tibatã and Una were 4.52 and 6.15%, respectively, on equilibrium with RH around 20%.

KEY WORDS: *Phaseolus vulgaris*, controlled deterioration, hermetic storage, seed longevity.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor mundial de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), responde por 16,3% da produção mundial e a comercialização de suas sementes tem exigido das empresas produtoras a adoção de moderna tecnologia para manutenção de altos graus de pureza, germinação e sanidade.

O feijoeiro representa o terceiro produto em área semeada e o quarto em valor de produção agrícola (CONAB, 2005). O esforço da pesquisa em obter melhores níveis de produtividade e garantir o abastecimento interno do produto é justificado pela importância social do feijão como alimento substituto de proteínas e rico em ferro, e pelo consumo generalizado da população brasileira.

A semente é um organismo vivo, necessitando ser armazenada em condições adequadas, desde a colheita até o plantio, para conservar as suas qualidades. O armazenamento é influenciado por vários fatores, principalmente as características intrínsecas da espécie com relação à sua longevidade, pelo genótipo e pelas condições ambientais de pré-armazenamento e de armazenamento.

A velocidade de deterioração das sementes, com a conseqüente perda de poder germinativo é geralmente muita elevada. O período em que a viabilidade pode ser mantida faz com que as pesquisas com armazenamento de sementes de espécies vegetais de interesse econômico, como é o caso do feijão, assumam caráter de extrema importância.

A maior limitação do teste de germinação, segundo HAMPTON & TEKRONY, (1995), é que não detecta diferenças de qualidade entre lotes com alta germinação. Por isso, tem sido desenvolvidos testes de vigor com o objetivo de identificar possíveis diferenças no potencial fisiológico de lotes que apresentam porcentagem de germinação semelhante, fornecendo informações complementares às obtidas no teste de germinação.

Os testes de envelhecimento acelerado e de deterioração controlada têm como princípio a aceleração do processo de deterioração (ROSSETO & MARCOS FILHO, 1995). Esse último, no entanto, mantém constantes os graus de umidade das sementes e as temperaturas de armazenamento, enquanto que no teste envelhecimento acelerado os graus de umidade das sementes são variáveis (HAMPTON & TEKRONY, 1995).

2. OBJETIVO

O presente trabalho teve como objetivo estudar a viabilidade de sementes de dois cultivares de *Phaseolus vulgaris* L. (IAC Tibatã e IAC Una), sob condições controladas de temperatura e de grau de umidade, visando a obtenção das constantes da equação de viabilidade para a espécie.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Longevidade de sementes

A longevidade das sementes pode ser influenciada pelo genótipo e pelas condições ambientais de pré-armazenamento e armazenamento. Para CARNEIRO & AGUIAR (1993), a longevidade da semente está relacionada com o período de tempo em que se mantém viável, que é uma característica de cada espécie. O verdadeiro período de longevidade das sementes de uma espécie qualquer só seria determinado se fosse possível colocá-las em condições ideais de armazenamento, o que é difícil na prática. É possível, porém, determinar a sua viabilidade, que é o período de vida da semente em uma determinada condição ambiental (CARVALHO & NAKAGAWA, 1988).

A viabilidade das sementes resulta de vários fatores, tais com as características genéticas da espécie ou cultivar, vigor das plantas progenitoras, condições climáticas predominantes durante a maturação das sementes, grau de dano mecânico e condições ambientais de armazenamento (CARVALHO & NAKAGAWA, 1988). Para TOLEDO & MARCOS-FILHO (1977), as condições ambientais de armazenamento são os fatores mais importantes para a conservação da viabilidade das sementes, especificamente a temperatura e o grau de umidade (DELOUCHE, 1980; ELLIS & ROBERTS, 1980).

O aumento da temperatura do ambiente de armazenamento provoca aumento da taxa respiratória da semente, de fungos e de insetos que a acompanham (POPINIGIS, 1985). O alto grau de umidade das sementes é uma das principais causas da perda do poder germinativo durante o armazenamento (DESAI et al., 1997), devido ao aumento da taxa respiratória e da ação dos microorganismos. Valores acima de 20% podem promover o aquecimento da massa de sementes a uma temperatura letal (HARRINGTON, 1972). Como consequência, a conservação da qualidade das sementes é alcançada pela redução do seu grau de umidade e da temperatura de armazenamento.

De acordo com HARRINGTON (1972), o período de viabilidade da semente pode ser dobrado com a redução de 1 ponto percentual no grau de umidade e a diminuição da temperatura em 5,6°C. Deve-se ressaltar que existem sementes que não toleram nem a redução do grau de umidade nem temperaturas baixas (sementes recalitrantes), o que dificulta a sua conservação durante o armazenamento.

Segundo POPINIGIS (1985), a qualidade da semente é expressa pela interação de quatro componentes: genético (características intrínsecas do cultivar, no que diz respeito à produtividade, resistência a pragas e doenças, etc.); fisiológico (potencial de longevidade da semente e sua capacidade de gerar uma planta perfeita e vigorosa); físico (pureza física do lote e condição física da semente) e sanitário (existência de insetos e microrganismos associados às sementes, desde o campo até o armazenamento). A deterioração é irreversível, sendo mínima por ocasião da maturidade fisiológica das sementes.

As condições climáticas durante a maturação das sementes e o grau de maturação durante a colheita são os principais fatores que afetam a sua qualidade inicial (DELOUCHE, 1980; ELLIS & ROBERTS, 1980). A semente atinge sua maturidade fisiológica (máximo vigor e máxima germinação) quando alcança o máximo teor de matéria seca, iniciando-se a partir daí os processos de deterioração (POPINIGIS, 1985). De acordo com BASRA et al. (2003), a deterioração da semente pode ocorrer devido à desintegração da membrana, à desativação de sistemas enzimáticos, à peroxidação de lipídios e ao aumento da acidez da gordura livre.

3.2 Qualidade das sementes após o processo de secagem

Dentre os fatores que contribuem para a manutenção da viabilidade de sementes durante o armazenamento, é de extrema importância o processo de secagem (RAMOS & ZANON, 1985; CARVALHO & NAKAGAWA, 1988). Para sementes passíveis de secagem, a redução do grau de umidade associada ao armazenamento apropriado restringe a velocidade do processo de deterioração, conferindo-lhes maior longevidade (HARRINGTON, 1972; ROBERTS, 1973).

Como todo material higroscópico, a semente troca (cede ou absorve) umidade com o ar que a envolve, ficando em equilíbrio com determinada umidade relativa ao ar, para uma mesma temperatura. Quando a semente e o ar que a envolve têm diferentes pressões de vapor, a umidade se movimenta da substância com maior para a com menor pressão de vapor, até que o ponto de equilíbrio seja atingido (PUZZI, 1986).

A velocidade de perda de umidade da superfície da semente para o meio ambiente é maior do que a do deslocamento do interior para a superfície da semente. Em função disso, o processo de secagem deve ser lento, possibilitando a migração de umidade do interior para a

superfície. A secagem drástica e rápida, como a obtida com o emprego de altas temperaturas, pode induzir à dormência secundária, como verificaram KAGEYAMA & MARQUEZ (1980) em sementes de *Pinus caribaea* var. *bahamensis*.

O período de secagem depende da espécie, do tipo e estágio de maturação dos frutos, da umidade inicial das sementes, da velocidade de secagem, do aumento da corrente de ar e do grau final de umidade desejado. Sementes de algumas espécies perdem umidade mais rapidamente no início e mais lentamente no decorrer do processo. Portanto, para se obter boa secagem, é preciso conhecer a espécie em questão (SILVA et al., 1993).

Durante o processo de secagem, os principais danos nas sementes são relativos às membranas fosfolipídicas das células, à desestruturação de macromoléculas e à oxidação de lipídios (GUIMARÃES, 1999).

A tolerância à dessecação é o resultado da interação de vários fatores, cuja ausência ou deficiência determina o grau de sensibilidade das sementes ao processo. Dentre um dos fatores ressaltam-se algumas características físicas intracelulares, como a quantidade e natureza das reservas insolúveis acumuladas. (PAMMENTER & BERJAK, 1999).

3.3 Comportamento das sementes durante o armazenamento

De acordo com HONG & ELLIS (1996), as sementes de espécies tropicais e temperadas seguem basicamente três padrões quanto ao comportamento durante o armazenamento: ortodoxo, intermediário e recalcitrante.

As sementes ortodoxas são tolerantes à dessecação e a temperaturas baixas, sem que nenhum dano fisiológico ocorra, o que permite a retenção do poder germinativo por longos períodos de armazenamento (ROBERTS, 1973). Estas sementes podem ser conservadas através da técnica da criopreservação que, em longo prazo, consiste em submetê-las, com o teor de água reduzido, a temperaturas de -80 a -196°C em nitrogênio líquido (FAO, 1993).

As sementes recalcitrantes são sensíveis à desidratação, mesmo mantendo-se um grau de umidade alto e perdem a viabilidade em um período de tempo relativamente curto (ROBERTS, 1973).

As sementes intermediárias sofrem danos de secagem quando o grau de umidade atinge valores próximos a 10% e podem sofrer injúrias quando a temperatura de armazenagem for muito baixa. Como não se comportam nem como ortodoxas nem como recalcitrantes, são

classificadas como intermediárias. Sementes desta categoria só podem ser conservadas durante prazos médios (ELLIS et al., 1990b; 1991).

A viabilidade das sementes de espécies pioneiras pode ser mantida por longos períodos de armazenamento (KAGEYAMA & VIANA, 1989), o que corresponde ao comportamento ortodoxo de armazenamento. Segundo HONG & ELLIS (1996), as espécies clímax apresentam comportamento recalcitrante, podendo ter, também, comportamento ortodoxo e intermediário.

A maioria das espécies vegetais produz sementes cujo comportamento durante o armazenamento é identificado por ROBERTS (1974) como do tipo ortodoxo, isto é, o armazenamento é tanto melhor quanto mais secas e/ou frias forem as condições ambientais. Nos casos em que a conservação da capacidade germinativa e da conservação das características genéticas das sementes é muito importante, como em bancos de germoplasma, procura-se controlar eficazmente esses fatores (umidade relativa e temperatura do ar), bem como dar início ao armazenamento somente após as sementes terem sido secadas a valores de umidade que garantam redução significativa das atividades metabólicas, entre 5 e 7% (CARVALHO & NAKAGAWA, 1988).

A identificação correta da categoria a que pertencem sementes de uma espécie é fundamental para o estabelecimento da metodologia de conservação de germoplasma. Assim, as sementes ortodoxas podem ser secas a baixos níveis de umidade sem a ocorrência de qualquer dano fisiológico, enquanto que as sementes recalcitrantes são sensíveis à desidratação, mesmo a teores altos de umidade, perdendo a viabilidade em um período de tempo relativamente curto (ROBERTS, 1973; ELLIS, 1991).

3.4 A equação de longevidade

Muitas equações têm sido propostas para relacionar as condições de armazenamento com o período de viabilidade das sementes, de modo a permitir uma previsão da sua sobrevivência bem como sua sensibilidade ao grau de umidade e à temperatura. Três equações básicas de viabilidade foram propostas, que em conjunto descrevem a viabilidade prevista após armazenamento em diferentes combinações de temperatura e grau de umidade (ELLIS e ROBERTS, 1980).

A primeira equação descreve a curva de sobrevivência da semente em termos de viabilidade (v = viabilidade em probit), após um período de armazenamento p (dias),

$$v = K_i - p (1/\sigma) \quad (1)$$

onde K_i é a constante do lote de sementes e σ é o desvio padrão da distribuição da frequência de sementes mortas em relação ao tempo, ou seja, é o tempo necessário para que a viabilidade caia de um probit, por exemplo, de 84,1 para 50%. As diferenças entre os lotes de sementes não afetam o valor de σ , porém as diferenças são significativas para o valor de K_i . Entretanto, as condições ambientais de armazenamento não têm efeito sobre K_i mas afetam o valor de σ de acordo com a equação:

$$\log \sigma = K_E - C_w \log m - C_H T - C_Q T^2 \quad (2)$$

Assim, o valor de σ pode ser estimado em determinado grau de umidade das sementes (m , %, base úmida) e temperatura de armazenamento (T , °C), onde K_E , C_w , C_H e C_Q são constantes, com valores comuns para todos os lotes de sementes de uma mesma espécie. As equações (1) e (2) podem ser combinadas como se segue:

$$v = K_i - p/10 K_E - C_w \log m - C_H T - C_Q T^2 \quad (3)$$

onde:

v = porcentagem de viabilidade prevista;

p = período de tempo em dias;

m = grau de umidade das sementes;

T = temperatura de armazenamento (°C);

K_i = constante que quantifica a qualidade inicial de cada lote de sementes antes do armazenamento;

K_E = constante para cada espécie;

C_w = indica a resposta logarítmica da longevidade das sementes para o grau de umidade;

C_H e C_Q = constantes linear e quadrática do termo temperatura respectivamente, (descrevem o efeito da temperatura de armazenamento na longevidade das sementes).

A equação de ELLIS & ROBERTS (1980) prevê, de forma simples e precisa, a viabilidade esperada (em termos percentuais) para qualquer lote de sementes durante o

armazenamento em diferentes valores de temperatura e grau de umidade, abrangendo quatro características essenciais da fisiologia de sementes (ELLIS et al., 1982):

- Embora a sobrevivência de lotes de sementes ou cultivares possa ser diferente quando armazenadas sob condições idênticas, as curvas de sobrevivência são sigmóides simétricas, podendo ser descritas pela distribuição normal negativa cumulativa, com o mesmo desvio padrão em qualquer combinação de temperatura e grau de umidade;
- A diferença entre os lotes de sementes é mantida em todas as condições de armazenamento em função do efeito relativo na longevidade, pois qualquer alteração na temperatura ou grau de umidade é a mesma para todos os lotes;
- Existe uma relação logarítmica negativa entre a longevidade e o grau de umidade das sementes;
- A longevidade da semente aumenta com o quadrado do decréscimo da temperatura, de tal modo que o Q_{10} (coeficiente de temperatura para mudança na taxa de perda de viabilidade para cada 10°C de aumento na temperatura) aumenta com a temperatura.

A equação conduziu a mudanças na interpretação das relações quantitativas entre longevidade de semente e ambiente de armazenamento, evidenciando que o efeito benéfico de temperaturas baixas na longevidade era menor do que se acreditava e, também, de que a redução do grau de umidade tinha um efeito bem maior (ELLIS et al., 1988).

Trabalhos recentes têm mostrado que muitas espécies consideradas anteriormente como recalcitrantes são certamente ortodoxas (ROBERTS et al., 1984). Estas incluem espécies de *Citrus*, mandioca, *Agathis*, algumas espécies de *Araucaria*, *Melia azadirachta* e provavelmente café e palmeiras. Estudando os gêneros *Coffea* e *Citrus*, HONG & ELLIS (1995) sugerem que existem variações intraespecíficas similares dentro dos dois gêneros e a classificação como “intermediária” é melhor do que ortodoxa ou a recalcitrante.

A sensibilidade à dissecação independente do método de secagem é uma característica do comportamento de semente recalcitrante (ANDRADE, 2001). A categoria recalcitrante inclui muitas espécies tropicais de interesse econômico, como a *Hevea brasiliensis*, *Theobroma cacao* L. e *Cocos nucifera*, várias espécies arbóreas tropicais das famílias

Dipterocarpacea e Araucariaceae, e espécies de clima temperado, como por exemplo, *Quercus robur* L. e *Castanea* sp. (ELLIS, 1991).

Sementes de algumas espécies sofrem danos de secagem em teores de umidade próximos a 10% e uma de suas principais características é que, quando secas, podem sofrer injúria pelo frio, portanto não se comportando inteiramente nem como ortodoxas nem recalitrantes, sendo classificadas como intermediárias (ELLIS et al., 1990a).

Segundo HARRINGTON (1972) e ROBERTS (1973), para sementes ortodoxas, a redução do grau de umidade associado ao armazenamento apropriado restringe a velocidade do processo de deterioração, conferindo-lhes maior longevidade.

A utilização de baixas temperaturas é indicada para a secagem das sementes, pois assim a ocorrência de danos térmicos é reduzida. Para VALENTINI (1992), também esse processo de remoção é lento, evitando tensões internas nas sementes e a incidência de danos mecânicos é muito pequena.

3.5 Atividade de água (A_w)

A remoção de água de alimentos sólidos surgiu, inicialmente, como uma forma de redução da atividade de água inibindo o crescimento microbiano. Apresenta importância na redução dos custos energéticos de transporte, embalagem e armazenagem das sementes que possuem grande quantidade de água em sua composição (PARK & NOGUEIRA, 1992).

Em sementes a água interage em vários níveis, limitados por outras moléculas. O nível para o qual o teor de água é limitado denomina-se atividade de água, que em uma determinada temperatura e pressão é descrita pela isoterma de sorção.

Quando uma semente é colocada em um ambiente cuja pressão de vapor é superior à dela, a umidade será transferida dela para o ambiente até que seja atingido um estado de equilíbrio. O teor de umidade neste ponto é denominado “teor de umidade de equilíbrio”, sendo o processo de transferência denominado “desorção”. Se a pressão de vapor da amostra for inferior à do ambiente, a transferência de umidade se dará do ambiente para a semente, até que seja atingido um estado de equilíbrio, em um processo denominado “sorção” (FIOREZE, 1989).

É possível estabelecer uma relação entre o teor de água livre na semente e sua conservação. O teor de água livre é expresso pela atividade de água, que é dada pela relação

entre a pressão de vapor de água em equilíbrio sobre a semente e a pressão de vapor de água pura, à mesma temperatura (MOHSEIN, 1986). A atividade de água também pode ser entendida como a umidade relativa em equilíbrio com a semente na temperatura considerada. Portanto, a atividade de água da semente determina a quantidade da água que tende a permanecer ou sair dela e, conseqüentemente, sua disponibilidade.

O grau de umidade de equilíbrio é definido como a quantidade de massa de água que a semente contém quando é submetida à determinada condição controlada de temperatura e umidade relativa do ar. Portanto, para uma determinada condição de secagem (temperatura e umidade relativa do ar), existe uma umidade de equilíbrio da semente. O diferencial entre a umidade inicial da semente e a umidade de equilíbrio ($U_o - U_e$) é definido como potencial de secagem. De outra forma, a semente só poderá ser seca até a umidade de equilíbrio para as condições de temperatura e umidade relativa pré-estabelecidas (CAVALCANTI-MATA, 1997).

As sementes ricas em óleo apresentam grau de umidade de equilíbrio mais baixo do que as sementes amiláceas quando armazenadas em condições semelhantes, pois sendo hidrófobas, absorvem bem menos água. Por exemplo, a 25°C e 70% UR, a soja tem grau de umidade de equilíbrio de 11,5% e o trigo 13,9%. Assim, para um armazenamento seguro, a soja deveria ser armazenada com um grau de umidade mais baixo que o trigo e outras sementes amiláceas (BROOKER et al., 1992). Para sementes com alto teor de óleo, o valor ótimo é inferior aos 5% de grau de umidade, que é o recomendado para armazenamento de sementes pelo International Plant Genetic Resources Institute (CHAI et. al., 1998).

O conhecimento das isotermas de equilíbrio higroscópico de grãos e sementes é de essencial importância, por estarem diretamente ligadas às operações de manuseio, armazenamento, secagem e comercialização das matérias primas (ROA & ROSSI, 1977).

Este tipo de informação pode ser usado para prever o crescimento de microorganismos em grãos e sementes e o potencial de deterioração no armazenamento. A maioria dos fungos de armazenamento não crescem e se reproduzem nos grãos que estão em equilíbrio com umidade relativa menor que 65%. Além disto, a atividade dos insetos de armazenamento diminui significativamente abaixo de 50% UR (LOEWER et al., 1994).

Segundo BROOKER et al. (1992), a variação do grau de umidade de equilíbrio é causada pela variedade, maturidade e história da semente, assim como pela técnica da medição da umidade relativa e pelo método de determinação do grau de umidade de equilíbrio.

O estudo da atividade de água pode ser feito através das isotermas de sorção. Uma isoterma é uma curva que descreve, em uma umidade específica, a relação de equilíbrio de uma quantidade de água sorvida por componentes da semente e a pressão de vapor ou umidade relativa, a uma dada temperatura. Esta relação é complexa e depende da composição química da semente (gorduras, amidos, açúcares, proteínas, etc.) (PARK e NOGUEIRA, 1992).

Com o intuito de prever o comportamento das isotermas, diversos autores propuseram modelos de ajuste de isotermas de sorção. Estes modelos são úteis no conhecimento das características das sementes. Em sua maioria são modelos empíricos que serão discutidos a seguir.

3.5.1 Modelo de BET (Brunauer, Emmet e Teller)

Considerando a natureza química da umidade e ampliando o conceito de Langmuir, Brunauer, Emmet e Teller (BET) propuseram, para camadas polimoleculares (PARK e NOGUEIRA, 1992):

$$X_{eq} = \frac{(X_m \cdot C \cdot a_w) \cdot (1 - (n+1) \cdot a_w^n + n \cdot a_w^{n+1})}{(1 - a_w) \cdot (1 + (C-1) \cdot a_w - C \cdot a_w^{n+1})}$$

onde:

- X_{eq} - conteúdo de umidade de equilíbrio, kg.kg^{-1} ;
- X_m - conteúdo de umidade na monocamada molecular, kg.kg^{-1} ;
- a_w - atividade de água, adimensional;
- C, n - constantes.

Esta equação tem dois importantes casos especiais: quando $n = 1$, ela fica reduzida à equação de Langmuir; quando n tende a infinito, ela se reduz à equação de BET linearizável.

3.5.2 Modelo de GAB (Guggenheim, Anderson e de Boer)

Guggenheim, Anderson e de Boer estenderam as teorias de adsorção física de BET, resultando numa equação tri-paramétrica, que permite um melhor ajuste dos dados de sorção

dos alimentos até a atividade de água de 0,9. A equação de GAB é escrita, segundo VAN DER BERG, 1984, como:

$$X_{eq} = \frac{X_m \cdot C \cdot K \cdot a_w}{(1 - K \cdot a_w) \cdot (1 - K \cdot a_w + C \cdot K \cdot a_w)}$$

onde:

- X_{eq} - conteúdo de umidade de equilíbrio, kg.kg^{-1} ;
- X_m - conteúdo de umidade na monocamada molecular, kg.kg^{-1} ;
- a_w - atividade de água, adimensional;
- C, K - constantes de adsorção.

As constantes C e K são relacionadas com as interações energéticas entre as moléculas da monocamada e as subseqüentes, num dado sítio de sorção. Quando $K = 1$, a equação de GAB fica reduzida à equação de BET linearizada para n infinito.

PARK e NOGUEIRA (1992) mostraram a conceituação do modelo de BET, concluindo que por apresentar três parâmetros a serem estimados (X_m , C e n) e sendo uma equação polinomial de grau maior que 2 dependendo do valor numérico de n estimado, o modelo de BET na sua forma original apresenta uma maior possibilidade de ajuste dos dados experimentais.

3.5.3 Modelo de HALSEY

HALSEY (1985) desenvolveu um modelo para a condensação das camadas a uma distância relativamente grande da superfície, a saber:

$$a_w = \exp\left(\frac{-A}{X_{eq}^B}\right),$$

onde:

- X_{eq} - conteúdo de umidade de equilíbrio, kg.kg^{-1} ;
- a_w - atividade de água, adimensional;
- A, B - constantes.

3.5.4 Modelo de OSWIN

O modelo baseia-se na expansão matemática para curvas de formato sigmoidal. Apresenta algumas vantagens sobre os modelos cinéticos de BET e GAB, com apenas duas constantes. É um modelo empírico, definido por CHINNAN e BEAUCHAT (1985) como:

$$X_{eq} = A \cdot \left(\frac{a_w}{1 - a_w} \right)^B,$$

onde:

- X_{eq} - conteúdo de umidade de equilíbrio, kg.kg^{-1} ;
- a_w - atividade de água, adimensional;
- A, B - constantes.

3.5.5 Modelo de PELEG

Modelo empírico de quatro parâmetros, que tenta conjugar duas tendências em uma equação (PELEG, 1993):

$$X_{eq} = k_1 \cdot a_w^{n_1} + k_2 \cdot a_w^{n_2}$$

onde:

- X_{eq} - conteúdo de umidade de equilíbrio, kg.kg^{-1} ;
- a_w - atividade de água, adimensional;
- k_1, k_2, n_1 e n_2 - constantes.

com a restrição de que $n_1 < 1$ e $n_2 > 1$.

3.5.6 Modelo de HENDERSON

Um dos modelos mais usados para a predição de isotermas é a equação empírica (ASAE, 1991):

$$X_{eq} = \frac{\ln(1 - a_w)}{-K \cdot (T + C)^{1/n}},$$

onde:

- X_{eq} - conteúdo de umidade de equilíbrio, kg.kg^{-1} ;
- a_w - atividade de água, adimensional;
- T - temperatura, °C;

- C, K, n - constantes.

3.5.7 Modelo CHUNG e PFOST

Este modelo é baseado na premissa de que a variação na energia livre para a adsorção está relacionada com o conteúdo de umidade (CHUNG e PFOST, 1967):

$$X_{eq} = E - D \cdot \ln((C - T) \cdot \ln(a_w)),$$

onde:

- X_{eq} - conteúdo de umidade de equilíbrio, kg.kg^{-1} ;
- a_w - atividade de água, adimensional;
- T - temperatura, °C;
- C, D, E - constantes.

3.6 Equilíbrio higroscópico

De acordo com LEOPOLD & VERTUCCI (1989), na semente existem pelo menos três tipos de água ligada às macromoléculas, tipos esses definidos pela força com que a água se encontra ligada à sua superfície. Os autores mostraram, em sementes de soja, que a água está no estado de “água ligada” até um nível de aproximadamente 35% de grau de umidade. Acima deste valor, as moléculas de água, em função da união com as partículas coloidais, adquirem uma configuração estrutural (espacial) diferente daquela de seu estado livre.

A água pode estar presente no material biológico sob as seguintes formas (ATHIÉ et al., 1998):

- Água livre, que pode ser removida facilmente durante o processo de secagem;
- Água solvente, que é retirada em grande parte na secagem;
- Água pseudoligada, que está fortemente absorvida.
- Água de constituição, que só pode ser removida em condições extremas de aquecimento utilizadas para determinação de umidade em laboratório.

Para os estudos de secagem e de armazenamento, a água que realmente é importante é a adsorvida, ou seja, aquela que, segundo HUNT & PIXTON (1974), resultaria em graus de umidade na faixa de 0 a 25%.

O mesmo resultado foi obtido por BENEDETTI & JORGE (1987) para o amendoim (alto teor de lipídeos), que apresentou uma menor umidade de equilíbrio que o arroz, feijão,

milho, soja e trigo uma mesma temperatura. CHAI et. al (1998), concluíram que, para sementes com alto teor de óleo, o valor ótimo de grau de umidade para armazenamento seguro é inferior aos 5% recomendados pelo IBPGR - International Plant Genetic Resources Institute.

A variação no conteúdo de umidade de equilíbrio é causada pela variedade, maturidade e história da semente, bem como pela técnica da medição da umidade relativa e pelo método de determinação do conteúdo de umidade de equilíbrio (BROOKER et al., 1992).

3.7 Equilíbrio higroscópico e temperatura

Nas curvas de equilíbrio higroscópico observa-se que, para uma mesma umidade relativa, o conteúdo de umidade de equilíbrio das sementes apresenta a tendência para um valor mais baixo à medida que a temperatura se eleva.

A temperatura tem um efeito significativo no conteúdo de umidade de equilíbrio. No milho, a umidade de equilíbrio a 70% de umidade relativa é 15,6% a 4,4°C e 10,3% a 60°C. Outras sementes apresentam similaridade no comportamento, onde um aumento na temperatura a uma umidade relativa constante diminui o conteúdo de umidade de equilíbrio (BROOKER et al., 1992).

3.8 Efeito histerese

A curva de sorção é determinada a partir de sementes com baixo grau de umidade e colocando-as em ambientes com diferentes umidades relativas e temperaturas constantes. Depois de obtido o equilíbrio higroscópico da amostra de sementes com o ambiente, determina-se o seu grau de umidade e se expressa graficamente os resultados. Uma outra curva pode ser obtida por perda de água das amostras, que graficamente dá origem à curva de desorção.

Os extremos das curvas sempre coincidem, e o ciclo formado entre a sorção e a desorção é chamado histerese, conforme se observa na Figura 1.

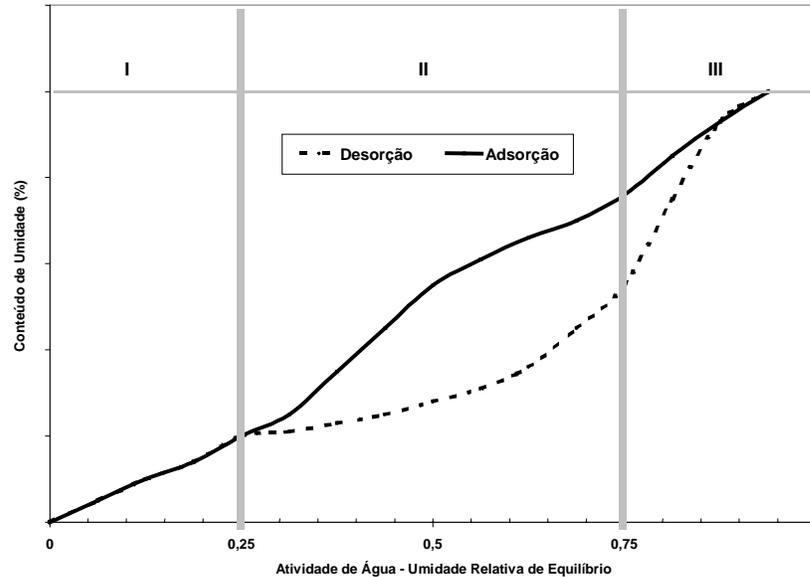


FIGURA 1: Gráfico mostrando o efeito histerese (CHUNG & PFOST, 1967).

O equilíbrio higroscópico é um pouco diferente quando a semente está absorvendo água (sorção) ou cedendo água (desorção). Essa diferença entre os valores de umidade de equilíbrio é conhecida como “histerese”.

Segundo CHUNG & PFOST (1967), essa histerese é causada pela Força de Van der Waals, devida às cargas positivas e negativas das grandes cadeias carbônicas. Com esse processo ocorrendo em todo o interior da semente, verifica-se no final que o conteúdo de umidade de equilíbrio alcançado é menor que no processo de desorção. A histerese nem sempre ocorre, pois os autores verificaram, após ciclos sucessivos de desorção/sorção, que a partir do terceiro ciclo o efeito não mais acontece. Em função dessas observações, formularam a hipótese de que a histerese ocorre quando o calor de desorção é maior do que o de sorção.

O efeito histerese ficou bem caracterizado para as sementes de amendoim, feijão, milho e trigo, enquanto que para arroz em casca e soja as curvas de sorção e desorção se confundem, não ficando clara sua ocorrência (BENEDETTI & JORGE, 1987).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Material

Foram utilizadas sementes de feijoeiro dos cultivares IAC Una e IAC Tibatã, da safra 2001/2002, originárias de Pindorama e do Núcleo Experimental de Campinas (NEC), em São Paulo, que apresentavam valores iniciais de germinação de 89 e 91% respectivamente.

4.2 Métodos

4.2.1 Determinação do grau de umidade das sementes

O grau de umidade das sementes foi determinado em três sub-amostras de sementes, de 5 g cada, mantidas em estufa a $105 \pm 3^\circ\text{C}$ durante 24 horas. Após esse período, os recipientes foram retirados da estufa, tampados e colocados em dessecador com sílica gel durante 10 a 15 minutos. A porcentagem de umidade foi calculada na base do peso úmido, aplicando-se a seguinte fórmula:

$$\% \text{ umidade (U)} = 100 \cdot (P-p) / P-t$$

onde

$$P = [\text{Peso inicial (g)} - \text{Peso (g) do recipiente e tampa}] + \text{Peso úmido (g)}$$

$$p = [\text{Peso final (g)} - \text{Peso (g) do recipiente e tampa}] + \text{Peso seco (g)}$$

$$t = \text{Tara} - \text{Peso (g) do recipiente e tampa}$$

O resultado final (grau de umidade das sementes) foi obtido através da média aritmética das porcentagens de cada uma das sub-amostras. (BRASIL, 1992).

4.2.2 Acondicionamento e armazenamento das sementes

Os graus de umidade das sementes foram ajustados a partir dos valores iniciais, antes do armazenamento (13,61 para Tibatã e 12,35% para Una), por meio de reidratação em dessecador, com uma lâmina de água destilada na sua base. Sobre o suporte do dessecador foram colocadas as sementes a serem reidratadas. Para a secagem, as sementes foram colocadas em dessecadores com sílica gel até a obtenção dos valores de umidade desejados, conforme mostram as Tabelas 1 e 2.

Tabela 1. Períodos de secagem necessários para atingir os níveis desejados de umidade (% base úmida), para os cultivares de feijão Tibatã e Una, a partir dos valores iniciais de grau de umidade.

Período de secagem (dias)	Tibatã Umidade (%)	Período de secagem (dias)	Una Umidade (%)
0	13,61	0	12,35
9	10,82	6	9,79
10	9,67	8	9,05
12	8,48	12	7,19
22	6,9	15	5,42
110	3,28	110	3,14

Tabela 2. Períodos de reidratação necessários para atingir os níveis desejados de umidade (% base úmida), para os cultivares de feijoeiro Tibatã e Una, a partir dos valores iniciais de grau de umidade.

Período de reidratação (dias)	Tibatã Grau de umidade (%)	Una Grau de umidade (%)
0	13,61	12,35
3	15,57	13,43
4	16,65	15,12
6	---	17,26

Durante os processos de secagem ou reidratação das sementes das duas variedades, as sub-amostras foram pesadas periodicamente, para controle da quantidade de água removida ou adquirida, empregando-se a equação proposta por VALENTINI (1992):

$$M_f = ((PB_i - T) * M_i + 100 * (PB_f - PB_i)) / (PB_f - T)$$

onde:

M_f = grau de umidade final (% , base úmida);

PB_i = peso bruto inicial (g);

T = tara (peso do recipiente, g);

M_i = grau de umidade inicial (% , base úmida)

PB_f = peso bruto final (g).

Ao ser atingido o peso desejado, correspondente ao grau de umidade final desejado para cada tratamento, os processos de secagem e reidratação foram encerrados.

As sementes foram a seguir acondicionadas em embalagens de alumínio seladas em termossoldadora, operando com uma barra aquecida a 204°C e 2” de contato. O papel laminado usado apresenta estrutura poliéster (PET) - alumínio (Al) - polietileno de baixa densidade (PEBD) com espessura total de 120 µm, com espessuras por camada de 12 µm (PET), 15 µm (Al) e 90 µm (PEBD).

Em seguida as embalagens foram armazenadas a 40, 50 e 65°C (±0,5°C) em estufas com controladores eletrônicos de temperatura até a obtenção de curvas completas de deterioração, conforme metodologia de ELLIS & ROBERTS (1980).

4.2.3 Germinação

Após a análise de pureza, foram instalados os testes de germinação, usando-se quatro sub-amostras de 50 sementes para cada cultivar, colocadas entre folhas de papel toalha umedecidas com água destilada, e em seguida encaminhadas para germinar em alternância de temperaturas de 20-30°C (BRASIL, 1992).

As contagens foram realizadas após 5 e 9 dias do início do teste, considerando-se como germinadas as sementes que emitiram a radícula, conforme critério adotado por DICKIE & SMITH (1995). A germinação é considerada como a retomada de crescimento do embrião, com o conseqüente rompimento do tegumento pela radícula, segundo LABOURIAU (1983).

Para as sementes com graus de umidade abaixo do valor inicial, foi realizada a sua reidratação lenta, previamente à instalação do teste de germinação, para evitar possíveis danos provocados pela reidratação rápida (ELLIS et al., 1988). As sementes permaneceram durante 48 horas em bandejas de nylon colocadas sobre um apoio no interior de uma caixa de plástico tipo gerbox vedada, a aproximadamente 3 cm acima de uma lâmina de água destilada.

4.2.4 Determinação de atividade de água

Para cada tratamento, ou seja, para cada umidade ajustada, foram obtidas, ao acaso, três sub-amostras de 100 sementes moídas, com peso médio de 3 g, para determinar a atividade de água, com a utilização da técnica do ponto de orvalho em espelho resfriado. Cada vez que se forma o orvalho no espelho o aparelho mede a temperatura e calcula a atividade de água da amostra, guardando esses valores para compará-los com valores prévios, até a reprodução das leituras (AQUALAB, 1997).

A determinação de atividade de água foi realizada na Faculdade de Engenharia de Alimentos (FEA) da UNICAMP, a $25 \pm 0,3^{\circ}\text{C}$, utilizando um higrômetro com resolução de 0,01 A_w . Este equipamento é acoplado a um banho termostatizado, com resolução de $0,1^{\circ}\text{C}$.

4.2.5 Armazenamento

As sementes de cada combinação temperatura / grau de umidade (mínimo de 10 sub-amostras) foram acondicionadas em embalagens de alumínio termosoldadas e a seguir armazenadas a 40, 50 e 65°C em estufas de secagem e esterilização com controlador eletrônico de temperatura microprocessado, onde permaneceram até a obtenção de curvas completas de deterioração, conforme metodologia de ELLIS & ROBERTS (1980).

A Tabela 3 mostra a distribuição das sementes em diferentes temperaturas e graus de umidade.

Tabela 3. Graus de umidade de sementes dos cultivares Una e Tibatã de *Phaseolus vulgaris*, armazenadas a 40, 50 e 65°C.

Una			Tibatã		
Temperatura de armazenamento °C					
40	50	65	40	50	65
17,26	17,26	17,26	16,65	16,65	16,65
16,1	16,1		15,57	15,57	
13,9	13,9			14,2	
13,43	13,43	13,43	13,61	13,61	13,61
12,5	12,5			12,9	
11	11		10,82		
	9,79	9,79	9,67	9,67	9,67
8,3	8,3		8,48	8,48	8,48
7,19	7,19	7,19		6,9	6,9
		5,42			3,28
		3,14			

4.2.6 Delineamento estatístico

Na obtenção da equação de viabilidade torna-se necessária a transformação dos valores de porcentagem de germinação em probit, pois deste modo os ciclos de vida individuais das sementes ficam uniformemente distribuídos. Assim, para cada tratamento (grau de umidade / temperatura) de cada lote de sementes, foram obtidas as curvas de longevidade em função de probit.

Os pontos de origem das retas no eixo Y (que seria o valor de K_i) obviamente não foram os mesmos necessitando, portanto, de um ajuste estatístico em cada curva, forçando-as a atingirem o mesmo valor com o menor erro possível. Para tanto foi utilizado o programa estatístico GLIM, para a obtenção dos respectivos valores de sigma (BAKER & NELDER, 1978).

Os valores de sigma indicam a inclinação das curvas de regressão ajustadas para a mesma origem ou, em termos mais práticos, o período de tempo necessário para a redução de um probit na viabilidade das sementes.

No experimento foi adotado o delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial de 3 x 10, com três temperaturas (40, 50 e 65°C) e 10 níveis de umidade.

O método Quasi-Newton (STATISTICA, 1995) de análise de regressão não linear foi usado para estimar as constantes dos modelos para ajuste das isotermas. Para confirmar que os parâmetros de regressão foram de fato únicos, a regressão foi repetida com estimativas de vários valores iniciais acima e abaixo dos calculados, através de método iterativo (PELEG, 1993). O critério usado para a avaliação foi o módulo do erro relativo médio:

$$E = \frac{100}{ne} \sum_{i=1}^{ne} \frac{|VE - VP|}{VE}, \text{ onde:}$$

- E - erro relativo médio;
- ne - número de dados experimentais;
- VE - valor experimental;
- VP - valor teórico.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Secagem das sementes

A partir das porcentagens iniciais de umidade das sementes dos cultivares de *Phaseolus vulgaris*, a saber, 13,61 (Tibatã) e 12,35 (Una), foi realizada a secagem em dessecadores com sílica gel para obtenção dos graus de umidade mais baixos (3,28 e 3,14%, respectivamente), como se observa na Figura 2.

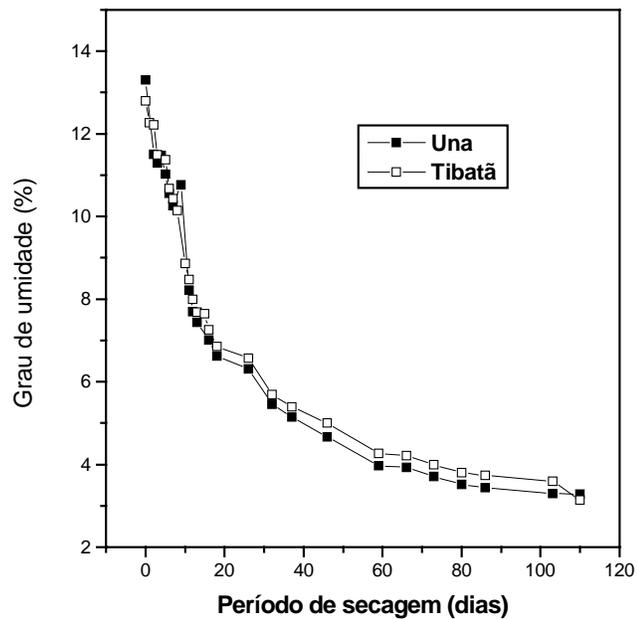


FIGURA 2. Taxa de secagem de sementes dos cultivares Tibatã e Una, sobre sílica gel a 25°C.

A qualidade fisiológica das sementes não foi alterada com a obtenção desses baixos valores de umidade, pois os valores de germinação obtidos foram semelhantes para todas as sub-amostras de controle nas diferentes umidades testadas (Tabela 4).

Tabela 4. Resultados médios de germinação (G, %) de sementes de cultivares de *Phaseolus vulgaris* em diferentes graus de umidade (GU, %, base úmida), após desidratação em dessecadores com sílica gel. P = germinação em probit; * grau de umidade inicial

Tibatã			Una		
GU	G	P	GU	G	P
10,82	98,0	2,10	9,79	95,0	1,65
9,67	97,0	1,89	9,05	99,5	2,49
8,48	94,0	1,56	7,19	96,0	1,76
6,9	95,5	1,70	5,42	91,0	1,34
3,28	89,0	1,23	3,14	94	1,56

Estes resultados estão de acordo com os obtidos por ELLIS et al. (1988) para três espécies, mostrando que reduções do grau de umidade nesses níveis não acarretam danos às sementes. Além disso, HONG & ELLIS (1992), trabalhando com sementes de cevada (*Hordeum vulgare* L.) e vigna (*Vigna radiata* L.), secas a níveis de umidade entre 3% e 16% e armazenadas hermeticamente durante 6 meses a 29°C, verificaram que nem a secagem nem o armazenamento hermético resultaram em perda de viabilidade das sementes.

Uma redução no grau de umidade da semente abaixo do grau de umidade crítico (5%) pode causar danos na viabilidade da semente. Porém alguns estudos têm mostrado que não existe efeito prejudicial induzido pela ultra-secagem em algumas sementes, e que a capacidade de armazenagem de sementes ultra-secas melhorou nos últimos 10 anos (WANG et al., 2001)

Além disso, HU et al. (1998), compararam a eficiência da secagem de sementes em sílica gel e freezer, em termos da taxa de secagem, perda do grau de umidade, custo relativo e morte das sementes e constataram que os dois métodos foram eficientes. No entanto, em sílica gel foram registrados menores graus de umidade e os custos foram mais baixos.

SANHEWE & ELLIS (1996) confirmaram que a secagem lenta é benéfica para a qualidade da semente em *Phaseolus vulgaris*, evitando deste modo possíveis danos causados por uma secagem rápida. As sementes com baixos graus de umidade resistem melhor às condições adversas do ambiente, e quando expostas a condições adequadas e na ausência de dormência, têm a capacidade de retomada do metabolismo no processo de germinação (BEWLEY & BLACK, 1994).

5.2 Grau de umidade da semente e a umidade relativa de equilíbrio

As umidades relativas de equilíbrio (A_w) detectadas para os cultivares de *Phaseolus vulgaris* são apresentadas na Tabela 5. O conhecimento desse parâmetro é de fundamental importância para o armazenamento seguro dessas sementes.

Tabela 5. Grau de umidade (U, %) e atividade de água (A_w) para os cultivares de feijoeiro Tibatã (Carioca) e Una (Preto).

Cultivar	GU (%)	A_w (%)
Tibatã	3.28	0.286
	6.9	0.354
	8.48	0.361
	9.67	0.372
	10.82	0.456
	13.61	0.627
	15.57	0.712
	16.65	0.725
Una	3.14	0.344
	5.42	0.370
	7.19	0.391
	9.05	0.433
	9.79	0.375
	12.35	0.540
	13.43	0.632
	15.12	0.695
17.26	0.758	

Em experimento com sementes de cenoura, amendoim, alface, canola e cebola, embaladas em embalagens de alumínio e armazenadas em 4 ambientes (umidade seca ou ultra-seca combinados em esquema fatorial com temperatura entre 20 e -20°C), HONG et al. (2005), verificaram que, depois de uma década, a mudança no grau de umidade das amostras armazenadas foi pequena ou nula. A secagem até uma umidade em equilíbrio entre 10 e 12% UR. não mostrou efeito deletério na longevidade das sementes quando armazenadas a -20°C.

5.3 Isotermas

Na Figura 3 estão apresentadas as isotermas de sorção e desorção para sementes dos cultivares de feijão obtidas a 25°C. Observaram-se variações nas extremidades das isotermas

para os valores mais baixos e mais altos de graus de umidade, enquanto que não foram detectadas variações para os valores médios.

O ponto de inflexão das isotermas (ao redor de 7,0% de umidade), considerando-se a diferença entre o primeiro e o segundo tipo de água ligada (baixo e intermediário graus de umidade), poderia acarretar a descontinuidade da relação logarítmica inversa entre longevidade e grau de umidade.

Os graus de umidade de equilíbrio das sementes dos cultivares foram semelhantes para as mesmas condições de armazenamento. Sementes ricas em óleo apresentam teores de umidade de equilíbrio mais baixos em relação às sementes amiláceas, quando expostas em condições semelhantes, pois não absorvem ou absorvem menos água por serem hidrófobas (BROOKER et al., 1992). Resultados semelhantes foram obtidos por BENEDETTI e JORGE (1987) para o amendoim (alto teor de lipídios), que apresentou uma menor umidade de equilíbrio do que o arroz, o milho, a soja e o trigo a uma mesma temperatura.

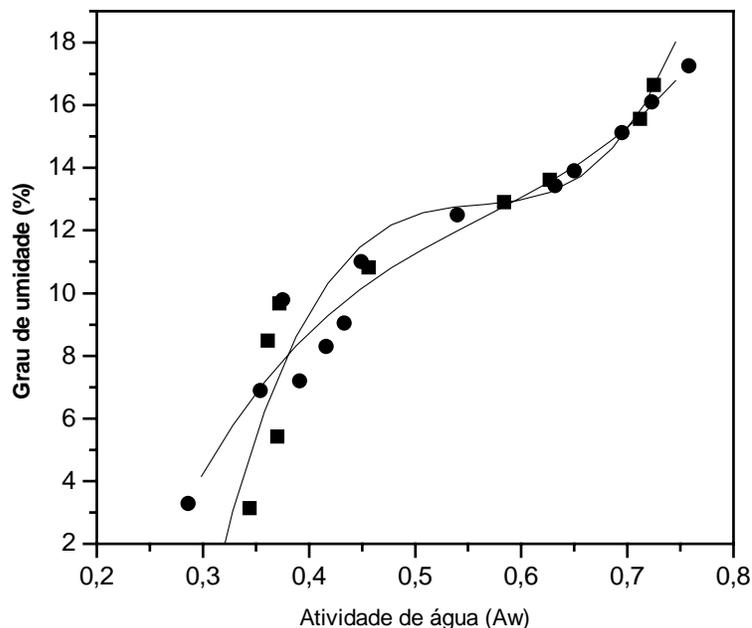


FIGURA 3. Isotermas de sorção e desorção, obtidas a 25°C para sementes dos cultivares Tibatã e Una.

Segundo VERTUCCI & LEOPOLD (1987), as isotermas abrangem três regiões distintas: duas em graus extremos de umidade, onde a umidade aumenta rapidamente para um pequeno aumento na umidade relativa, e uma região intermediária, onde o gradiente é lento. As três regiões correspondem aproximadamente às diferentes categorias de água ligada que ocorrem nos tecidos: com baixo grau de umidade a água nas sementes é mantida por ligações muito fortes, enquanto que para umidades intermediárias e altas a água é mantida por ligações fracas e água multimolecular, respectivamente.

A Tabela 6 apresenta os valores das constantes estimadas, o coeficiente de determinação e os módulos dos erros relativos médios para os modelos de isotermas de sorção.

Tabela 6. Estimativas dos parâmetros dos modelos empíricos.

Modelo	Constantes, R ² e Erro	Tibatã	Una
BET	XM	28,433183	0,641400
	C	0,01245	0,47921
	N	0,692034	0,946808
	R ²	0,98201	0,95657
	E%	3,03	2,90
BET LINEAR	XM	0,050845	0,048770
	C	359,67771	236,77114
	R ²	0,88986	0,53338
	E%	10,05	9,78
GAB	XM	0,671848	0,750558
	C	2,01980	0,98711
	K	0,161725	0,246359
	R ²	0,95393	0,91267
	E%	4,88	4,49
PELEG	K ₁	0,061348	0,061001
	n ₁	0,15096	0,05778
	K ₂	0,148143	0,147751
	n ₂	1,291546	1,308640
	R ²	0,98284	0,96238
	E%	2,12	2,38
OSWIN	A	0,114822	0,117496
	B	0,33648	0,32081
	R ²	0,99225	0,98833
	E%	0,94	1,70
HALSEY	A	0,318916	0,021468
	B	0,40520	1,51924
	R ²	0,66763	0,89955
	E%	15,97	5,65
HENDERSON	XM	0,561149	
	C	0,41773	
	N	1,192271	
	R ²	0,97610	
	E%	5,33	

As curvas de desorção para os dois cultivares foram melhor ajustadas pelo modelo de dois e quatro parâmetros (Oswin para o Tibatã e Peleg para o Una). A avaliação do melhor ajuste, feita pelo valor do desvio relativo entre os dados experimentais e os valores estimados (Tabela 6), mostra erro relativo de 0,94 para Tibatã e 2,38% para Una.

As comparações entre valores experimentais e previstos para os dois cultivares, usando os modelos matemáticos de Oswin e Peleg, estão descritos nas Figuras 4 e 5, que representam a combinação de isotermas de sorção e desorção, dependendo de se os valores foram obtidos abaixo ou acima dos graus de umidade iniciais.

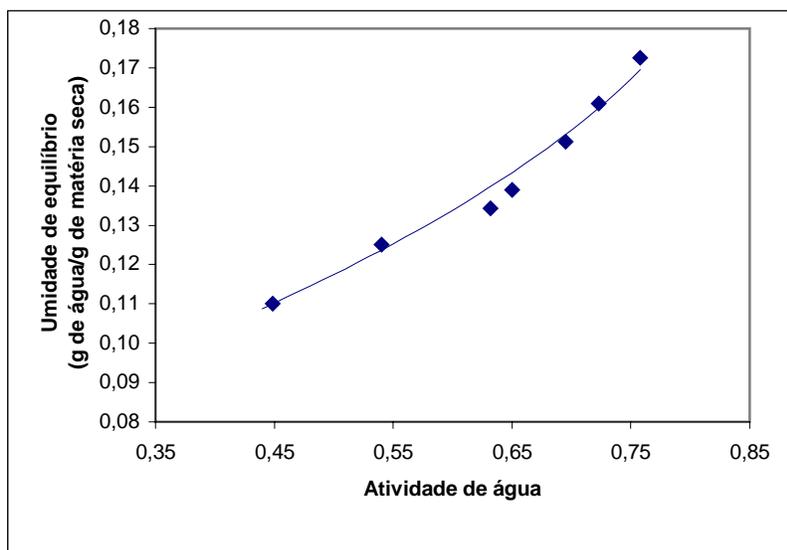


FIGURA 4. Modelo de Oswin ajustado aos valores experimentais para Tibatã.

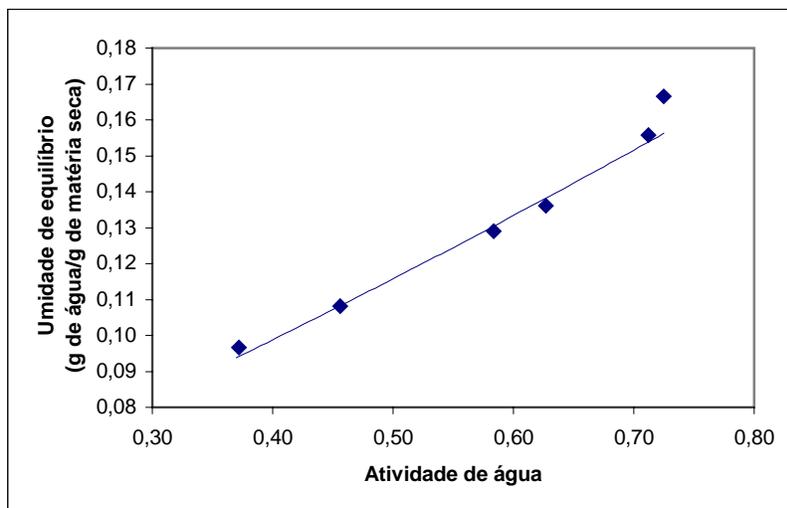


FIGURA 5. Modelo de Peleg ajustado aos valores experimentais para Una.

5.4 Curvas de sobrevivência

Para a análise da deterioração das sementes nos diferentes tratamentos, os valores de porcentagens de germinação das sementes foram transformados em probit e a seguir plotados linearmente em relação ao período de armazenamento das sementes, originando curvas de sobrevivência sigmoidais cumulativas negativas.

5.4.1 Curvas de sobrevivência a 40°C

As curvas de sobrevivência das sementes do cultivar Tibatã a 40°C e com graus de umidade de 6,9; 8,3; 12,9; 14,2; 15,9 e 17,2% são apresentadas na Figura 6. Observou-se inicialmente o grande efeito do aumento do grau de umidade na deterioração das sementes, variando de 200 dias (6,9%) para 5 dias (17,2%). Notou-se, também, que as curvas de sobrevivência mostraram a mesma tendência para os graus de umidade testados.

As curvas de sobrevivência das sementes do cultivar Una a 40°C e com graus de umidade de 7,2; 8,3; 11,0; 12,5; 13,4 e 16,6% são apresentadas na Figura 7. Novamente aqui fica evidente o efeito do aumento do grau de umidade na deterioração das sementes, variando de 210 dias (7,2%) e 3 dias (16,6%) e também que as curvas de sobrevivência apresentaram as mesmas tendências.

Analisando-se as Figuras 6 e 7, fica evidente que as sementes do cultivar Tibatã apresentaram maior longevidade do que as do cultivar Una, nas mesmas condições de armazenamento, tais como na umidade de 8,3%, quando as longevidades obtidas foram de 115 e 80 dias (Tibatã e Una, respectivamente).

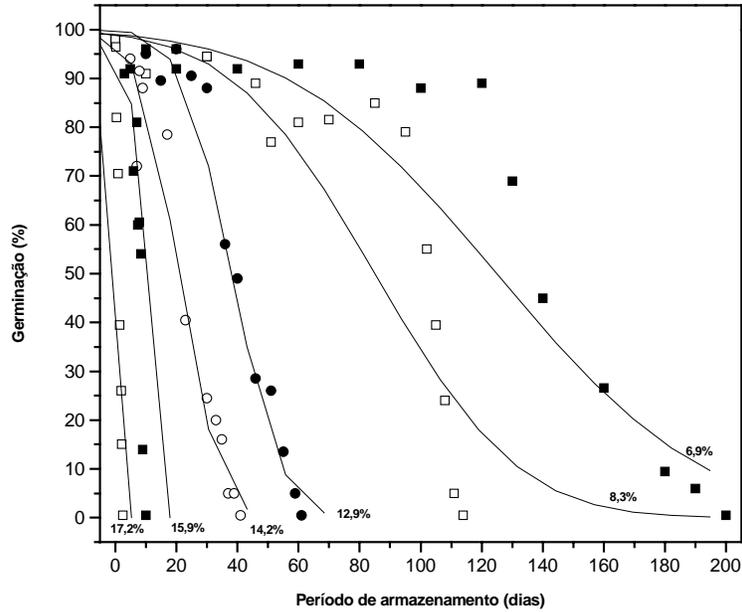


FIGURA 6. Germinação de sementes de feijão do cultivar Tibatã armazenadas a 40°C e com graus de umidade de 6,9; 8,3; 12,9; 14,2; 15,9 e 17,2%.

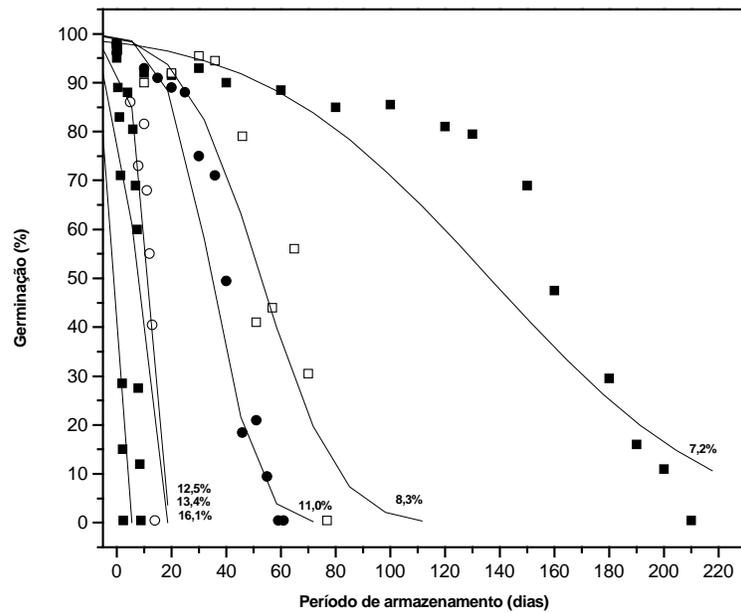


FIGURA 7. Germinação de sementes de feijão do cultivar Una armazenadas a 40°C e com graus de umidade de 7,2; 8,3; 11,0; 12,5; 13,4 e 16,6%.

5.4.1 Curvas de sobrevivência a 50°C

As curvas de sobrevivência do cultivar Tibatã, com graus de umidade de 6,9; 8,3; 12,9; 14,2; 15,9 e 17,2% e armazenadas a 50°C são mostradas na Figura 8. Com o aumento da

temperatura de armazenamento, as mesmas tendências das curvas de sobrevivência foram observadas. Além disso, novamente aqui fica evidente o efeito negativo do aumento do grau de umidade na deterioração das sementes.

A Figura 9 apresenta as curvas de sobrevivência de sementes de feijão do cultivar Una armazenadas a 50°C e com graus de umidade de 7,2; 8,3; 11,0; 12,5; 13,4 e 16,6%. Observou-se que este cultivar foi significativamente mais sensível aos graus de umidade, principalmente os mais elevados. Fica assim evidente que o aumento do grau de umidade deslocou as curvas de sobrevivência para a esquerda, a partir do grau de umidade 9,8%.

Analisando-se as Figuras 8 e 9, observaram-se diferenças no comportamento desses cultivares em deterioração controlada, sendo que o cultivar Una apresentou uma maior sensibilidade à umidade do que o Tibatã. Nas umidades mais baixas (6,9 e 8,3% para Tibatã e 7,2 e 8,3% para Una), a longevidade das sementes aumentou sensivelmente, mas o comportamento dos cultivares manteve-se constante. Para graus de umidade semelhantes, observou-se que os períodos de armazenamento foram diferentes, mostrando assim o efeito direto do aumento da temperatura na longevidade das sementes. SANHEWE et al. (1996), encontraram uma significativa relação positiva entre o aumento da longevidade potencial (DK(I)/DT) e o efeito da temperatura para o desenvolvimento da qualidade de sementes de trigo (*Triticum aestivum* L).

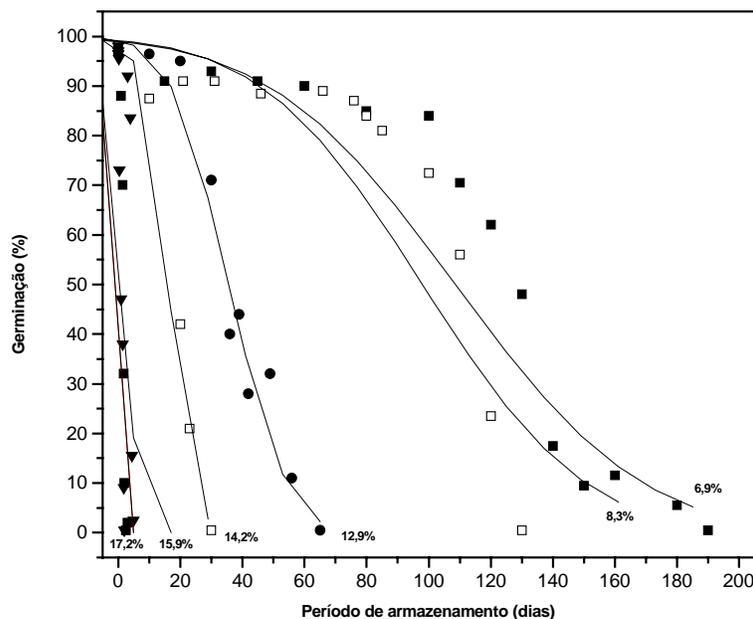


FIGURA 8. Germinação de sementes de feijão do cultivar Tibatã armazenadas a 50°C e com graus de umidade de 6,9; 8,3; 12,9; 14,2; 15,9 e 17,2%.

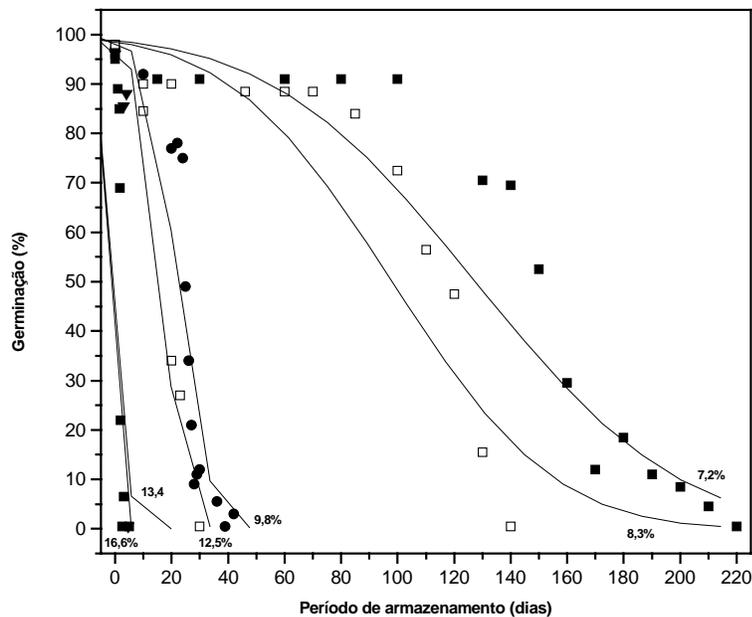


FIGURA 9. Germinação de sementes de feijão do cultivar Una armazenadas a 50°C e com graus de umidade de 7,2; 8,3; 11,0; 12,5; 13,4 e 16,6%.

5.4.3 Curvas de sobrevivência a 65°C

As curvas de sobrevivência de sementes de feijão do cultivar Tibatã armazenadas a 65°C e com graus de umidade de 3,3; 6,9; 8,5; 9,7; 13,6 e 16,7% são apresentadas na Figura 10. Apesar da elevada temperatura de armazenamento, as sementes com grau de umidade de 3,3% ainda se mostravam viáveis aos 80 dias de armazenamento. Por outro lado, com os graus de umidade de 13,6 e 16,7%, a longevidade das sementes reduziu-se drasticamente, ficando ao redor de 3 dias de armazenamento.

Para o cultivar Una, armazenadas a 65°C e com graus de umidade de 3,1; 5,4; 7,2; 9,8; 13,4 e 17,3% (Figura 11), a curva de sobrevivência da umidade mais baixa (3,1%) mostrou uma longevidade ao redor de 20 dias, enquanto que as referentes às umidades mais altas (13,4 e 17,2%) mostraram longevidade ao redor de 2 dias.

Comparando-se as Figuras 10 e 11, fica evidente a maior longevidade das sementes do cultivar Tibatã a 65°C, quando comparada com a do Uma, com graus de umidade semelhantes

(3,3 e 3,1% para Tibatã e Una) na mesma temperatura, mostrando longevidade de 80 e 22 dias para Tibatã e Una respectivamente. Esse comportamento diferente dos cultivares, mais pronunciado nos graus de umidade mais baixos, parece ser devido à diferente composição química das sementes dos cultivares. Comparações de longevidade de sementes entre *Eragrostis tef* e *Guizotia abyssinica*, em condições similares de armazenamento, mostraram que diferenças entre longevidade de sementes entre espécies são resultado de diferenças de potenciais de água da semente criados por diferenças na composição da semente (ZEWDIE & ELLIS, 1991).

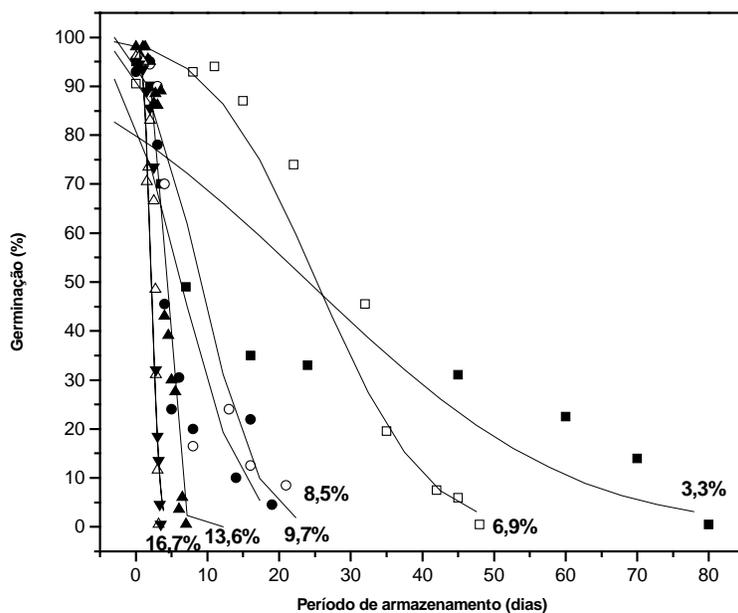


FIGURA 10. Germinação de sementes de feijão do cultivar Tibatã armazenadas a 65°C e com graus de umidade de 3,3; 6,9; 8,5; 9,7; 13,6 e 16,7%.

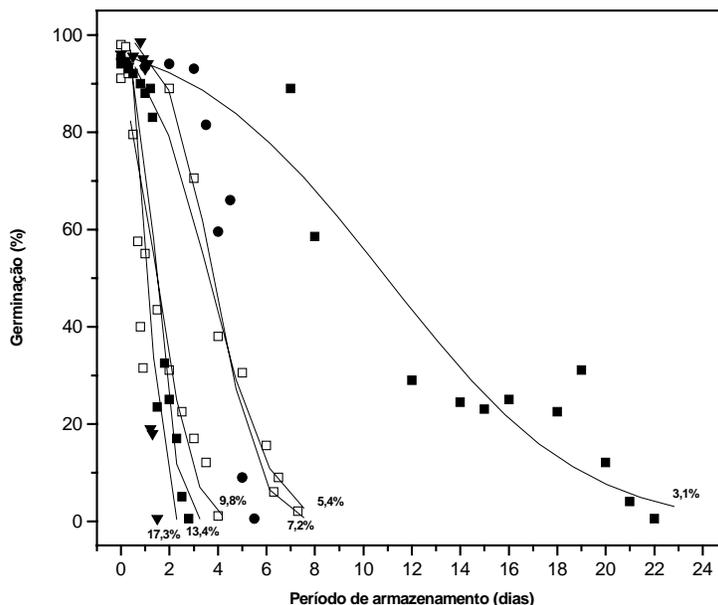


FIGURA 11. Germinação de sementes de feijão do cultivar Una armazenadas a 65°C e com graus de umidade de 3,1; 5,4; 7,2; 9,8; 13,4 e 17,3%.

5.5 Constantes de viabilidade para os cultivares

A variância residual para as curvas de sobrevivência nas diferentes temperaturas de armazenamento foi analisada para cada cultivar isoladamente (Tabelas 7 e 8), para se fazer um melhor ajuste na equação de viabilidade.

Para o cultivar Tibatã (Tabela 7) o valor de K_i foi 2,013, equivalente a 97% de germinação. Não foi observada diferença significativa para a interação temperatura / grau de umidade. Os valores de sigma detectados para as temperaturas variaram de 0,68 a 64,7 dias (40°C), de 0,53 a 30,55 dias (50°C) e de 0,04 a 11,27 dias (65°C).

Para o cultivar Una (Tabela 8) o valor de K_i foi 2,216, equivalente a 98% de germinação. Novamente aqui não foi observada diferença significativa para a interação temperatura / grau de umidade. Os valores de sigma detectados variaram de 0,7 a 66,49 dias (40°C), de 0,68 a 31,67 dias (50°C) e de 0,08 a 3,40 dias (65°C). CHAVES & USBERTI (2004) determinaram os valores de K_i de 0,999 e 1,798 para *Dimorphandra mollis* e *Dalbergia nigra*, respectivamente.

Estudando a longevidade de sementes de três espécies arbóreas e cinco anuais, de -13 a 90°C e grau de umidade de 1,8 a 25%, DICKIE et al. (1990) concluíram que a relação quantitativa entre a longevidade da semente e a temperatura não variou entre as espécies, o

que significou que os valores de $C_H = 0,0329$ e $C_Q = 0,000478$ poderiam ser aceitos como constantes.

Tabela 7. Análise estatística de sementes de *Phaseolus vulgaris* do cultivar Tibatã, armazenadas a 40, 50 e 65°C, após todas as curvas de deterioração terem sido direcionadas para o mesmo ponto de origem (K_i). GU = grau de umidade; ** = diferença significativa; ns = sem diferença significativa a $p < 0,01$.

$K_i = 2,013$					
	Fonte da variação	SQ	GL	QM	F
Ângulos de regressão	Dias	2115	1	2115	126,18**
Interação	TT*Dias	18167	21	865,09	51,61**
Efeito principal	GU / °C	1574	21	74,95	4,47ns
	Erro	2547,8	152	16,76	
	Total	24404	195		

GU%	40°C		50°C		65°C	
	Ângulo	Sigma	Ângulo	Sigma	Ângulo	Sigma
3,28					0,08871	11,27
5,42					0,24865	4,02
6,9			0,03273	30,55	0,35195	2,84
8,48	0,01545	64,72	0,0486	20,58	0,51105	1,96
9,67	0,03823	26,16	0,07688	13,01	0,90305	1,11
10,82	0,06888	14,52	0,13575	7,37	1,59645	0,63
13,61	0,10508	9,52	0,54005	1,85	2,59445	0,39
15,57	0,26955	3,71	1,40745	0,71	26,7355	0,04
16,65	1,46445	0,68	1,89345	0,53		

Tabela 8. Análise estatística de sementes de *Phaseolus vulgaris* do cultivar Una, armazenadas a 40, 50 e 65°C, após todas as curvas de deterioração terem sido direcionadas para o mesmo ponto de origem (K_i). GU = grau de umidade; ** = diferença significativa; ns = sem diferença significativa a $p < 0,01$.

$K_i = 2,216$					
	Fonte da variação	SQ	GL	QM	F
Ângulos de regressão	Dias	1677	1	1677	84,41**
Interação	TT*Dias	19758	19	1039,89	52,34**
Efeito principal	GU / °C	353,72	19	18,62	0,94ns
	Erro	3178,9	160	19,868	
	Total	24968	199		

GU%	40°C		50°C		65°C	
	Ângulo	Sigma	Ângulo	Sigma	Ângulo	Sigma
3,14					0,29404	3,40
7,19			0,03158	31,67	0,57904	1,73
9,05	0,01504	66,49	0,03572	28,00	0,56304	1,78
9,79	0,05442	18,38	0,11456	8,73	1,43304	0,70
12,35	0,07453	13,42	0,14584	6,86	2,95304	0,34
13,43	0,20754	4,82	0,55594	1,80	12,595	0,08
15,12	0,34004	2,94	1,27204	0,79		
17,26	1,43104	0,70	1,46704	0,68		

A constante K ($K = K_E - C_{HT} - C_Q T^2$) fornece uma média simplificada da equação de viabilidade quando somente uma temperatura é considerada (ELLIS et al., 1989). A constante obtida define a equação a 40, 50 e 65°C que, para o cultivar Tibatã foram $K = 6,939$; 5,836 e 1,961, e $C_W = 5,521$; 4,940 e 2,138. Para o cultivar Una os valores obtidos foram $K = 7,624$; 5,905, 1,137 e $C_W = 6,157$; 4,922 e 1,407, respectivamente.

As análises de variância para as sementes dos dois cultivares de feijão, após a análise estatística e adequações, são apresentadas nas Tabelas 9 e 10 para Tibatã e Una,

respectivamente. Não houve interação significativa entre o logaritmo do grau de umidade das sementes e a temperatura de armazenamento para os dois cultivares, a saber: $F = 1,19$ (Tibatã) e $0,69$ (Una).

Tabela 9. Análise de variância de todos os sigmas para sementes do cultivar Tibatã após análise estatística e adequações.

Fonte	GL	SQ	QM	F
Logaritmo do grau de umidade (LGU)	1	3.787	3.787	62.21**
Temperatura (T)	2	7.418	3.709	60.93**
LGU*T	2	0.1449	0.07245	1.19ns
Resíduo	14	0.85217	0.0610	
Total	19	12.203		

Tabela 10. Análise de variância de todos os sigmas para sementes do cultivar Una após análise estatística e adequações.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F
Logaritmo do grau de umidade (LGU)	1	2.840	2.840	53.15**
Temperatura (T)	2	6.771	3.385	63.36**
LGU*T	2	0.07387	0.03694	0.69ns
Resíduo	12	0.64119	0.0534	
Total	17	10.326		

O limite inferior de aplicação da equação de longevidade fornece uma orientação prática para a secagem das sementes antes do armazenamento. Este limite varia entre espécies ortodoxas, como por exemplo, de 2,0% para o amendoim (ELLIS et al., 1990a) e de 6,2% para a pêra (ELLIS et al., 1989).

Para o cultivar Tibatã a variância residual diminuiu significativamente após a remoção dos resultados referentes aos graus de umidade mais baixos a 65°C (1,15 e 3,28%). Já para o cultivar Una o melhor ajuste ocorreu com a remoção dos resultados dos dois menores graus de umidade a 65°C (1,39 e 3,14%). A partir daí foram calculados os limites inferiores para

aplicação da equação de longevidade nessa temperatura, obtendo-se os valores de 4,52 e 6,15% para Tibatã e Una respectivamente.

A Tabela 11 mostra os valores calculados para as constantes de viabilidade K_E , C_W , C_Q e C_H obtidos para os cultivares Tibatã e Una. Essas constantes podem prever a longevidade das sementes dentro de uma grande faixa de condições de armazenamento (TOMPSETT, 1989).

Tabela 11. Valores das constantes de viabilidade K_E , C_W , C_Q e C_H determinadas para sementes de Tibatã e Una

Cultivar	Constantes de viabilidade			
	K_E	C_W	C_H	C_Q
Tibatã	5,759	4,598	0,04509	0,001014
Una	4,556	5,209	0,1213	0,001764

Observou-se uma similaridade entre os valores das constantes de viabilidade para os cultivares. ELLIS (1984) observou que os valores de C_W estimados para as sementes de cereais foram em torno de 6,0, enquanto que para sementes oleaginosas foram menores, ao redor de 3,5, indicando assim que para se obter um mesmo acréscimo na longevidade, é necessário reduzir os graus de umidade a níveis mais baixos do que os do primeiro grupo.

Sementes de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) apresentaram relação logarítmica negativa entre a longevidade e os graus de umidade de 15,9 e 16,4%, em armazenamento hermético em temperaturas constantes e também todas as curvas de sobrevivência mostraram o mesmo ponto de origem. As estimativas para as constantes C_H e C_Q da equação da viabilidade, foram de 0,0346 ($\pm 0,0058$) e 0,000401 ($\pm 0,000096$) respectivamente (HUNG et al., 2001).

As sementes de feijão-de-corda e grão-de-bico ($C_W = 4,715$ e $4,829$ respectivamente) foram mais sensíveis à umidade do que as de soja ($C_W = 3,979$) (ELLIS et al., 1982). Os valores de C_W obtidos para os cultivares de *Phaseolus vulgaris* estão próximos aos de feijão-de-corda e grão-de-bico.

A Figura 12 mostra as relações logarítmicas entre o grau de umidade das sementes e o desvio padrão da frequência de distribuição das sementes mortas no tempo (sigma) a 40, 50,

65°C para Tibatã (A) e Una (B). Observou-se uma similaridade na tendência das retas obtidas, permitindo assim obter com precisão as constantes de viabilidade da equação.

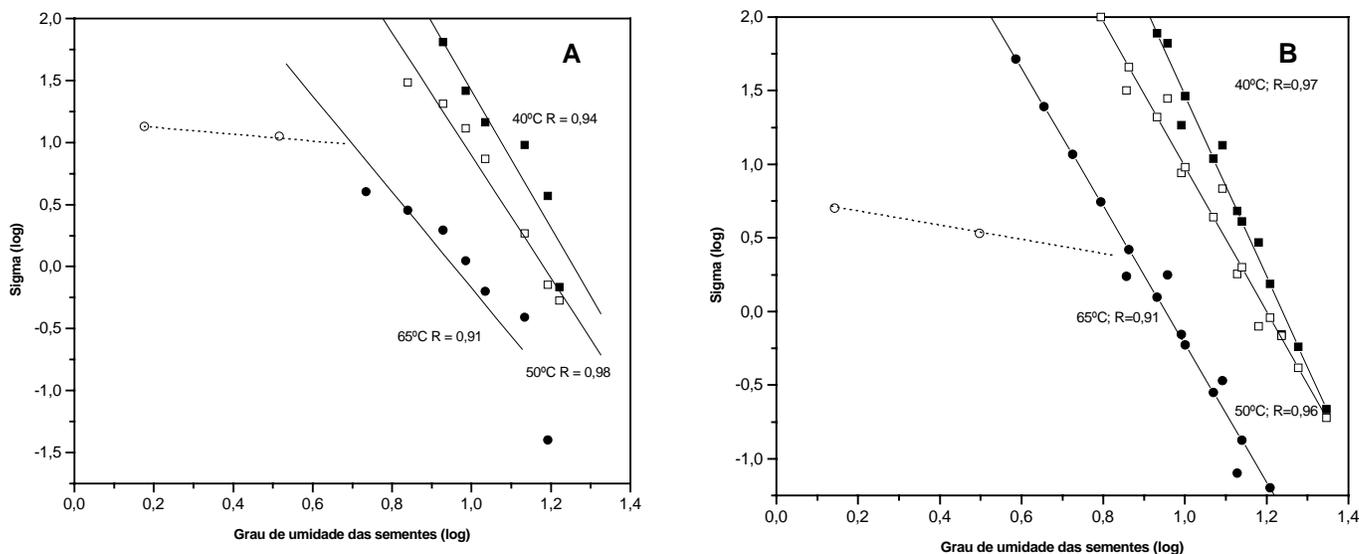


FIGURA 12. Relação logarítmica entre o grau de umidade (% base úmida) e o desvio padrão da distribuição de frequência das sementes mortas no tempo (sigma) para os cultivares Tibatã (A) e Una (B), em armazenamento hermético a 40, 50 e 65°C.

Analisando-se essas Figuras verificou-se também que as retas de regressão obtidas para o cultivar Tibatã (A) foram mais deslocadas para a direita, enquanto as do cultivar Una (B) apresentaram ângulos de inclinação mais acentuados, mostrando assim que o tempo para redução de um probit (sigma) foi menor. Observaram-se também os graus de umidade mais baixos, que definem o limite mínimo para aplicação da equação de longevidade nessa temperatura, a partir do qual cessa a relação logarítmica.

A longevidade de sementes de *Cicer arietinum* L., *Vigna unguiculata* L. e *Glycine max* L. foi avaliada por ELLIS et al. (1982) em armazenamento hermético durante dois anos, a -20 a 70°C e umidade de 5 a 25%. A variação da temperatura e da umidade não influenciou a longevidade dessas sementes e houve uma relação logarítmica inversa entre o grau de umidade e a longevidade. Segundo ELLIS & ROBERTS (1980) e ELLIS et al. (1988, 1990a), para diversas espécies há uma relação logarítmica inversa entre a longevidade das sementes e o grau de umidade.

As equações de viabilidade estimadas para a longevidade de sementes de Tibatã e Una foram:

$$v = Ki - p/10^{5,759 - 4,598 \cdot \log m - 0,04509t - 0,001014T^2} \quad (\text{Tibatã})$$

$$v = Ki - p/10^{4,556 - 5,209 \cdot \log m - 0,1213t - 0,001764T^2} \quad (\text{Una})$$

A equação da longevidade foi também determinada para sementes de amendoim, através das constantes $KE = 6,177$, $CW = 3,426$, $CH = 0,0304$ e $CQ = 0,000453$. Entretanto, o valor mínimo de umidade para aplicação desta equação está ao redor de 2,4% (USBERTI & GOMES, 1998).

Utilizando os valores estimados de $C_W = 3,76$ e $K_E = 7,55$ na equação de viabilidade, com a temperatura de -20°C e o grau de umidade em equilíbrio higroscópico a 15°C e 15% UR, MEDEIROS (1997) verificou que o tempo previsto para a viabilidade das sementes de *Astronium urundeuva* cair de um probit seria de 1.167 anos.

ELLIS et al. (1990a), armazenando sementes de *P. vulgaris* a 65°C e 11 graus de umidade (de 3,3 a 13,6%) por até 80 dias, verificaram uma relação logarítmica negativa entre o grau de umidade da semente e a sua longevidade.

Trabalhando com sementes de *Dimorphandra mollis* e *Dalbergia nigra*, CHAVES & USBERTI (2004) verificaram, através da equação de longevidade, que as sementes dessas espécies necessitarão de 316 e 34 anos, respectivamente, para cair um probit em sua germinação, quando armazenadas a -20°C com grau de umidade de 2,9% (base úmida).

Assim, utilizando-se os valores das constantes calculadas na equação de longevidade, verificou-se que as sementes do cultivar Tibatã necessitarão de 45 dias para a perda de um probit na sua viabilidade, quando armazenadas a 20°C com grau de umidade de 10%, enquanto que as do cultivar Una necessitarão somente de 12 dias, confirmando assim que o primeiro cultivar apresenta, de fato, maior longevidade.

6. CONCLUSÕES

- As sementes do cultivar Tibatã mostraram maior longevidade em comparação com o cultivar Una.
- Foi observada uma relação inversa entre o teor de água e a longevidade das sementes;
- Os modelos de ajuste de isothermas que mais se adaptaram foram os de Oswin e Peleg para Tibatã e Una, respectivamente;
- Os limites inferiores de grau de umidade para aplicação da equação de longevidade a 65°C foram de 4,52 e 6,15% para os cultivares Tibatã e Una, respectivamente;
- As constantes para prever a longevidade de sementes foram: $K_E = 5,759$ e $4,556$; $C_W = 4,598$ e $5,209$; $C_H = -0,0451$ e $-0,1213$; $C_Q = 0,001014$ e $0,001764$, para Tibatã e Una, respectivamente.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. ASAE. **Moisture Relationship of Grains**. St. Joseph, 1991, p.363-7. (ASAE Data, D245.4)

ANDRADE, A.C.S. The effect of moisture content and temperature on the longevity of heart of palm seeds (*Euterpe edulis*). **Seed Science and Technology**, Zurich, v.29, p.171-182, 2001.

AQUALAB. **Analisador de atividade de água Decagon**. Brasil: ABRASEQ, 1997. 21p. (Manual, 01).

ATHIÉ, I.; CASTRO, M.F.M.; GOMES, R.A.R.; VALENTINI, S.R.T. Alterações nos grãos durante a estocagem. In: ATHIÉ, I.; CASTRO, M.F.M.; GOMES, R.A. R.; VALENTINI, S.R.T. **Conservação de grãos**. Campinas: Fundação Cargill, P.9-18, 1998.

BASRA, S.M.A.; AHMAD, N.; KHAN, M.M.; IQBAL, N.; CHEEMA, M.A. Assessment of cottonseed deterioration during accelerated ageing. **Seed Science and Technology**, Zurich, v.31, p.531-540, 2003.

BAKER, R.J.; NELDER, J. A. **The GLIM system. Release 3**. Oxford: Numerical Algorithms Group. 1978.

BENEDETTI, B.C.; JORGE, J.T. Curvas de umidade de equilíbrio de vários grãos. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.7, p.172-188, 1987.

BEWLEY, J.D.; BLACK, M. **Seeds: physiology of development and germination**. New York: Plenum Press, 1994. 445p.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. **Regras para análise de sementes**. Brasília: SNDA/DNDV/CLAV, 1992. 365 p.

BROOKER, D.B., BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. Grain equilibrium moisture content. In: **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York. 1992. p.67-86.

CARNEIRO, J.G.A.; AGUIAR, I.B. Armazenamento de sementes. In: AGUIAR, I.B.; PIÑARODRIGUES, F.C.M.; FIGLIOLIA, M.B. **Sementes Florestais Tropicais**. Brasília. ABRATES, 1993. 350p.

CARVALHO, N.M.; NAKAGAWA, J. **Sementes, ciência, tecnologia e produção**. 3. Ed. Campinas, Fundação Cargill, 1988. 424p.

CAVALCANTI-MATA, M.E.R.M. **Secagem a nível de produtor**. In: Simpósio de armazenamento de grãos e sementes nas propriedades rurais. Campina Grande: UFPB, 1997. 291p.

CHAI, J.F.; MA, R.Y.; LI, L.Z.; DU, Y.Y. Optimum moisture contents of seeds stored at ambient temperatures. **Seed Science Research**, Wallingford, v.8, Suppl. 1, p.23-28, 1998.

CHAVES, M.M.F.; USBERTI, R. Controlled seed deterioration in *Dalbergia nigra* and *Dimorphandra mollis*, endangered Brazilian forest species. **Seed Science and Technology**, Zurich, v.32, p.883-893, 2004.

CHINNAN, M.S.; BEAUCHAT, L.R. Sorption isotherms of whole cowpeas and flours. **Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie**, London, v.18, p.83-8, 1985.

CHUNG, D.S.; PFOST, H.B. Adsorption and desorption of water vapour by cereal grains and their products. **Transactions of the ASAE**, v.10, p.149-57, 1967.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. 2005. www.conab.gov.br.

DELOUCHE, J.C. Environmental effects on seed development and seed quality. **Horticultural Science**, v.15, p.775-780, 1980.

DESAI, B.B.; KOTTECHA, P.M.; SALUNKE, D.K. **Seed handbook: biology, production, processing and storage**. New York: Marcel Dekker, p.627, 1997.

DICKIE, J.B.; ELLIS, R.H.; KRAAK, H.L. RYDER, K.; TOMPSETT, P.B. Temperature and seed storage longevity. **Annals of Botany**, London, v.65, p.197-204, 1990.

DICKIE, J.B.; SMITH, R.D. Observations on the survival of seeds of *Agathis* sp. stored at low moisture contents and temperature. **Seed Science Research**, Wallingford, v.5, p.5-14, 1995.

ELLIS, R. H.; ROBERTS, E. H. Improved equations for the prediction of seed longevity. **Annals of Botany**, London, v.4, p.13-30, 1980.

ELLIS, R.H. The meaning of viability. In: DICKIE, J.B.; LININGTON, S.H.; WILLIAMS, J.T. (Eds). **Seed management techniques for gene banks**, Rome: International Board for Plant Genetic Resources, p.146-178. 1984.

ELLIS, R.H. The longevity of seeds. **Horticultural Science**, v.26, p.1119-1125, 1991.

ELLIS, R.H.; HONG, T.D.; ROBERTS, E.H. A low-moisture-content limit to logarithmic relations between seed moisture content and longevity. **Annals of Botany**, London, v.61, p.405-408, 1988.

ELLIS, R.H.; HONG, T.D.; ROBERTS, E.H. A comparison of the low-moisture-content limit to the logarithmic relation between seed moisture and longevity in twelve species. **Annals of Botany**, London, v.63, p.601-611, 1989.

ELLIS, R.H.; HONG, T.D.; ROBERTS, E.H.; TAO, K.L. Low moisture content limits to relations between seed longevity and moisture. **Annals of Botany**, London, v.65, p.493-504, 1990a.

ELLIS, R.H.; HONG, T.D.; ROBERTS, E.H. An intermediate category of seed storage behaviour? I Coffee. **Journal of Experimental Botany**, London, v.41, p.1167-1174, 1990b.

ELLIS, R.H.; HONG, T.D.; ROBERTS, E.H. Effect of storage temperature and moisture on the germination of papaya seeds. **Seed Science Research**, Wallingford, v.1, p.69-72, 1991.

ELLIS, R.H.; OSEI-BONSU, K.; ROBERTS, E.H. The influence of genotype, temperature and moisture on seed longevity in chickpea, cowpea and soybean. **Annals of Botany**, London, v.50, p.69-82, 1982.

FAO. **Ex situ storage of seeds, pollen and in vitro cultures of perennial woody plant species**. Rome: FAO, 83p. (FAO Forestry Paper, n.113). 1993.

FIOREZE, R. Equação para o teor de umidade de equilíbrio estático para produtos biológicos. **Revista de Tecnologia e Ciência**, v.3, p.9-11, 1989.

GUIMARÃES, R.M. **Fisiologia de sementes**. Lavras: UFLA/FAEPE, 1999. 129p. (Curso de Pós-graduação “Latu Sensu” Especialização a Distância: Produção e Tecnologia de Sementes).

HALSEY, G. Physical adsorption on uniform surfaces. **Journal of Chemical Physics**, Woodbury, v.16, p.931-7, 1985.

HAMPTON, J.G.; TEKRONY, D.M. Controlled deterioration test. In HAMPTON AND TEKRONY. **Handbook of vigour test methods**. Zurich: ISTA. p.70-78, 1995.

HARRINGTON, J.F. Seed storage longevity. In: KOZLOWSKI, T.T. (Ed.). **Seed Biology**, New York: Academic Press, v.3, p.145-245, 1972.

HONG, T.D.; ELLIS, R.H. The survival of germinating orthodox seeds after desiccation and hermetic storage. **Journal of Experimental Botany**, London, v.43, p.239-247, 1992.

HONG, T.D.; ELLIS, R.H. Interspecific variation in seed storage behaviour within two genera - *Coffea* and *Citrus*. **Seed Science and Technology**, Zurich, v.23, p.165-81, 1995.

HONG, T.D.; ELLIS, R.H. **A protocol to determine seed storage behaviour**. Rome: International Plant Genetic Resources Institute, 1996. 55p. (IPGRI. Tech. Bulletin, 1).

HONG, T.D.; ELLIS, R.H., ASTLEY, D.; PINNEGAR, A.E.; GROOT, S.P.C.; KRAAK, H.L. Survival and vigour of ultra-dry seeds after ten years of hermetic storage. **Seed Science and Technology**, Zurich, v.33, p.449-460, 2005.

HU, X.R.; ZHANG, Y.L.; HU, C.L.; TAO, M.; CHEN, S.P. A comparison of methods for drying seeds: vacuum freeze-drier versus silica gel. **Seed Science Research**, Wallingford, v.8, supplement n.1, p.29-33, 1998.

HUNG, L.Q.; HONG, T.D.; ELLIS, R.H. Constant, fluctuating and effective temperature and seed longevity: a tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) exemplar. **Annals of Botany**, London, v.88, p.465-470, 2001.

HUNT, W.H.; PIXTON, S.W. Moisture - Its significance, behaviour and measurement. In: CHRISTENSEN, C.M. **Storage of cereal grains and their products**. Amer. Assoc. Cereal Chem. Incorporated, Minnesota, USA, 1974, pp.1-53.

KAGEYAMA, P.Y.; MARQUEZ, F.C.M. Comportamento de sementes de curta longevidade armazenadas com diferentes graus de umidade iniciais: gênero: *Tabebuia*. In: **Tropical Seed Problems**, 1980.

KAGEYAMA, P.Y.; VIANA, V.M. **Tecnologia de sementes e grupos ecológicos de espécies arbóreas tropicais**. Piracicaba. ESALQ/USP, 1989. 19p. (Trabalho apresentado no Simpósio Brasileiro Sobre Tecnologia de Sementes Florestais) 2, 1989, São Paulo.

LABOURIAU, L.G. **A germinação das sementes**. OEA: Washington, 1983. 174p.

LEOPOLD, A.C.; VERTUCCI, C.W. Moisture as a regulator of physiological reactions in seeds. In: STANWOOD, P.C.; McDONALD, M.B. **Seed Moisture**. Crop Science Society of America, Special Publication. 1989, p.1-67.

LOEWER, O.J.; RIDGES, T.C.; BUCKLIN, R.A. Principles of Drying. In: **On-Farm Drying and Storage Systems**. American Society of Agricultural Engineers. 1994. p.27-71.

MEDEIROS, A.C.S. **Comportamento fisiológico, conservação de germoplasma a longo prazo e previsão de longevidade de sementes de aroeira (*Astronium urundeuva* (Fr. All.) Engl.)**. Jaboticabal, 1997. 127p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

MOHSENIN, N.N. **Physical properties of plants and animals materials**. 2.ed. Amsterdam: Gordon and Breach Publishers, 1986. 841p.

PAMMENTER, N.W.; BERJAK, P. A review of recalcitrant seed physiology in relation to desiccation-tolerance mechanisms. **Seed Science Research**, Wallingford, v.9, p.13-37, 1999.

PARK, K.J.; NOGUEIRA, R.I. Modelos de ajuste de isoterma de sorção de alimentos. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v.3, p.81-6, 1992.

PELEG, M. Assessment of a semi-empirical four parameter general model for sigmoid moisture sorption isotherms. **Journal of Food Processing Engineering**, Connecticut-USA, v.16, p.21-37, 1993.

POPINIGIS, F. **Fisiologia da semente**. AGIPLAN, Brasília, 1985. 289p.

PUZZI, D. Características dos grãos armazenados. In: **Abastecimento e armazenagem de grãos**. Campinas, SP: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, p.113-132, 1986.

RAMOS, A.; ZANON, A. **Armazenamento de sementes de espécies florestais**. In: Simpósio brasileiro sobre tecnologia de sementes florestais. Belo Horizonte, 1984. Anais, Belo Horizonte, p. 285-316, 1985.

ROA, G.; ROSSI, S.J. Determinação experimental de curvas de teor de umidade de equilíbrio mediante a medição da umidade relativa de equilíbrio. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v.2, p.17-22, 1977.

ROBERTS, E.H. Predicting the storage life of seeds. **Seed Science and Technology**, Zurich, v.1, p.499-514, 1973.

ROBERTS, E.H. **Viability of seeds**. London, Chapman and Hall Ltd., 1974. 448p.

ROBERTS, E.H.; KING, M.W.; ELLIS, R.H. **Recalcitrant seeds: their recognition and storage**. In: HOLDEN, J.H.W.; WILLIAMS, J.T. (Ed.). Crop Genetic Resources: Conservation and Evaluation. George Allen and Unwin, London. 1984. p.38-52.

ROSSETO, C.A.V.; MARCOS FILHO, J. Comparação entre os métodos de envelhecimento acelerado e de deterioração controlada para avaliação da qualidade fisiológica de sementes de soja. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.57, p.289-292, 1995.

SANHEWE, A.J.; ELLIS, R.H. Seed development and maturation in *Phaseolus vulgaris*.2. Post-harvest longevity in air-dry storage. **Journal of Experimental Botany**, London, v.47, p.959-965, 1996.

SANHEWE, A.J.; ELLIS, R.H.; HONG, T.D., WHEELER, T.R.; BATTIS, G.R.; HADLEY, P.; MORISON, J.I.L. The effect of temperature and CO₂ on seed quality development in wheat (*Triticum aestivum* L). **Journal of Experimental Botany**, London, v.47, p.631-637, 1996.

STATISTICA for Windows 5.0. **Computer program manual**. Tulsa, OK: Stat Soft Inc., 1995.

SILVA, A.; FIGLIOLIA, M.B.; AGUIAR, I.B. Secagem, extração e beneficiamento de sementes. In: AGUIAR, I.B.; PIÑA-RODRIGUES, F.C.M.; FIGLIOLIA, M.B. **Sementes Florestais Tropicais**. Brasília. ABRATES, 1993. 350p.

TOLEDO, F.F.; MARCOS-FILHO, J. **Manual de sementes; tecnologia da produção**. São Paulo: Ceres, 1977. 224p.

TOMPSETT, P.B. **Predicting the storage life of orthodox tropical forest tree seeds**. In: TURNBULL, J.W. (Ed.) Tropical tree seed research. Australian, 1989, p.93-8 (Aciar Proceedings, 28).

USBERTI, R.; GOMES, R.B.G. Seed viability constants for groundnut. **Annals of Botany**, London, v.82, p.691-694, 1998.

VALENTINI, S.R.T. **Efeito da secagem de sementes de peroba-rosa (*Apidosperma polyneuron* M. Arg.)**. Campinas, 1992. 70p. Tese (Mestrado em Engenharia Agrícola).Universidade Estadual de Campinas.

VAN DER BERG, C. Description of water activity of foods for engineering purposes by means of the GAB model of sorption. In: MCKENNA, B.M. (ed.). **Engineering and Food**. London: Elsevier Applied Science, v.1, p.311-21, 1984.

VERTUCCI, C.W., LEOPOLD, A C. Water binding in legume seeds. **Plant Physiology**, Rockville, v.85, p.224-231, 1987.

WANG, X.F.; JING, X.M.; ZHENG, G.H. Effect of seed moisture content on seed storage longevity. **Journal of Integrative Plant Biology**, v.43, p.551-557, 2001.

ZEWDIE, M.; ELLIS, R.H. Comparisons of seed longevity between tef and niger in similar storage-conditions. **Seed Science and Technology**, Zurich, v.19, p.303-307, 1991.