**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

Aspectos epidemiológicos da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar

Thaïs Dias Martins

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor
em Ciências. Área de concentração: Fitopatologia

**Piracicaba
2010**

Thaís Dias Martins
Engenheiro Agrônomo

Aspectos epidemiológicos da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar

Orientador:
Prof. Dr. **ARMANDO BERGAMIN FILHO**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Fitopatologia

**Piracicaba
2010**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP**

Martins, Thaís Dias

Aspectos epidemiológicos da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar / Thaís Dias

Martins. - - Piracicaba, 2010.

65 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2010.

1. Cana-de-açúcar 2. Ferrugem (Doença de planta) - Epidemiologia 3. Fungos
fitopatogênicos 4. Mapas 5. Modelos epidemiológicos I. Título

CDD 633.61
M386a

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

A Deus e a Nossa S. Aparecida por dar sentido a todos os passos de minha vida,
Agradeço.

À minha mãe, Tárzia, que é meu modelo pessoal e profissional,
Ofereço.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Armando Bergamin Filho pela orientação e pela oportunidade de compartilhar do seu conhecimento.

Ao Prof. Dr. José Otávio Machado Menten pelo grande apoio na minha vida acadêmica, principalmente no início do Doutorado, quando ainda meu orientador.

Ao Prof. Dr. Richard Neil Raid (EREC/UF) e Prof. Dr. Jack Comstock (USDA) pela orientação nos Estados Unidos e por oferecerem condições excelentes para o desenvolvimento do trabalho de tese.

Ao Centro de Tecnologia Canavieira-CTC, em especial Dr. William Lee Burnquist, Dr. Enrico Arrigoni, Adhair Ricci Júnior e Dra. Cassiara Regina N. C. B. Gonçalves por todo apoio dado a este trabalho e às supervisões.

À Prof. Dra. Lilian Amorim pela supervisão e acompanhamento das análises realizadas neste trabalho.

Ao Prof. Dr. Modesto Barreto e suas alunas Mariana Vilela Lopes e Lonjoré Leocádio de Lima, da UNESP/Jaboticabal, pela participação no desenvolvimento dos mapas de risco de epidemia.

Ao Prof. Dr. Alfredo Seiiti Urashima pela torcida, apoio e participação neste projeto.

Ao Prof. Dr. Luiz Eduardo Aranha Camargo por me informar pela primeira vez sobre a ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar e pelo apoio.

Aos pesquisadores do USDA, Prof. Dra. Sushma Sood e Prof. Dr. Neil Glynn pelos ensinamentos que me permitiram alcançar o método de inoculação, entre outros conhecimentos.

A todos os funcionários do setor de Fitopatologia da ESALQ, entre eles, Jeferson, Fabiana, Vera, Fernanda e Rodolfo.

A todos os funcionários do EREC/UF e do USDA/Canal Point, em especial David, Chay, Brandy, Sandy, Contita, Maria, Amanda, Silvia, Jose, Leonard, Igang, Kathy, Barbara, Kan e Katherine.

Aos meus grandes amigos do EREC/UF, Jaya Das, Gaurav Goyal, Miguel Baltazar, Ann Hartman, Gary Hartman e Santiago Rosero pelos cuidados, ensinamentos e companheirismo.

Ao Prof. Dr. Robert Gilbert pela amizade e ensinamentos.

Às minhas amigas do Laboratório de Patologia de Sementes, Maria Heloisa Duarte de Moraes, Vanessa Cristina Frare e Anne Tremocoldi pelo carinho e torcida.

A Bruno Marco Lima, Thayne Munhoz e Paulo Ramos pelo apoio indispensável no início do meu doutorado.

Aos meus amigos do Laboratório de Epidemiologia, Dra. Maria Cândida Gasparoto, Dr. Fabrício Packer, Dra. Maria Cristina C. Rappussi da Silva, Geraldo J. S. Júnior, Júlio Barbosa, Alécio S. Moreira, pelas discussões frequentes sobre fitopatologia e epidemiologia. Além desses, agradeço também Sílvia Afonseca Lourenço, Guilherme Frare, Felipe Boresztein, Juliana Baggio, Isabela Primiano e Aricelis Biscaro Mela pela amizade.

Ao Eng. Agr. Ricardo Tadeu Pongeluppi pela amizade e participação desde nossos tempos de graduação.

Ao meu pai, que sempre demonstra entusiasmo e orgulho ao participar de todos os passos da minha formação.

A todos os professores, alunos e demais funcionários do Departamento de Fitopatologia da ESALQ, da UF e do USDA.

Às bibliotecárias Eliana e Silvia pela revisão das referências deste estudo.

Ao CNPq pela concessão das bolsas de estudos (doutorado e doutorado SWE).

Sê

“Se não puderes ser um pinheiro no topo de uma colina,
Sê um arbusto no vale,
Mas sê o melhor arbusto à margem do regato.
Sê um ramo, se não puderes ser uma árvore.
Se não puderes ser um ramo, sê um pouco de relva
E dá alegria a algum caminho.

Se não puderes ser uma estrada,
Sê apenas uma senda,
Se não puderes ser o Sol, sê outra estrela.
Não é pelo tamanho que terás êxito ou fracasso...
Mas sê o melhor no que quer que sejas.”

Pablo Neruda

SUMÁRIO

RESUMO	11
ABSTRACT	13
1 INTRODUÇÃO	15
2 DESENVOLVIMENTO	17
2.1 Revisão Bibliográfica	17
2.1.1 A cultura da cana-de-açúcar	17
2.1.2 A ferrugem alaranjada	18
2.1.3 Efeito das condições ambientais e elaboração de mapas de zona de risco de epidemia.....	23
2.2 Material e Métodos	27
2.2.1 Germinação de urediniósporos e comprimento de tubo germinativo sob diferentes temperaturas	27
2.2.2 Efeito da temperatura e do período de molhamento foliar sob infecção, período de incubação e período de latência da ferrugem alaranjada da cana-de- açúcar	28
2.2.2.1 Análise de dados	31
2.2.3 Mapas de zonas de risco de epidemias quanto a possível ocorrência de ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo	32
2.2.3.1 Região de estudo e obtenção dos dados	32
2.3 Resultados	34
2.3.1 Germinação de urediniósporos e tamanho de tubo germinativo sob diferentes temperaturas	34
2.3.2 Efeito da temperatura e do período de molhamento foliar sob infecção, período de incubação e período de latência da ferrugem alaranjada da cana-de- açúcar	36
2.3.3 Mapas de zonas de risco de epidemias quanto a possível ocorrência de para ferrugem alaranjada da cana-de- açúcar no Estado de São Paulo	43
2.4 Discussão.....	50
3 CONCLUSÕES	57

REFERÊNCIAS	59
-------------------	----

RESUMO

Aspectos epidemiológicos da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar

A ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar (*Puccinia kuehnii*) foi relatada pela primeira vez no Brasil em dezembro de 2009. Em países onde a doença já ocorre, danos de até 40% foram relatados. Diante da presente situação, os objetivos deste estudo foram: (i) verificar a germinação de esporos sob diferentes temperaturas, *in vitro*, (ii) verificar aspectos epidemiológicos da ferrugem alaranjada sob diferentes períodos de molhamento foliar e temperaturas, *in vivo*, sob condições controladas, e (iii) desenvolver mapa de zona de risco de epidemia para o Estado de São Paulo. Para a germinação de esporos, *in vitro*, foram utilizadas lâminas de vidro, vertidas com ágar-água, onde foi espalhada suspensão de conídios sobre o meio de cultura, mantidas em câmara úmida por até 22 h e foram avaliados a porcentagem de esporos germinados e o comprimento dos tubos germinativos. No experimento *in vivo*, plantas de um mês de idade da variedade suscetível CL85-1040 foram inoculadas e destinadas a 36 tratamentos que representaram a interação entre seis temperaturas (10, 15, 20, 25, 30 e 35°C) e seis períodos de molhamento foliar (0, 4, 8, 12, 18 e 24 h). O experimento foi realizado duas vezes. A severidade da doença foi medida pela contagem de número de lesões na folha zero. Também foram medidos diâmetros das lesões, no último dia de avaliação. Para o desenvolvimento do mapa de zona de risco para o Estado de São Paulo, foram empregados dados meteorológicos dos anos de 2002 a 2005. Modelos de previsão foram utilizados para gerar índices e para calcular as porcentagens de dias favoráveis à infecção. No experimento *in vitro* observou-se que há germinação de urediniosporos a 10, 15, 20 e 25°C. No entanto, o crescimento do tubo germinativo é mais rápido conforme a temperatura aumenta, apresentando redução do crescimento na temperatura de 25°C ou superior. No experimento *in vivo* observou-se aparecimento da doença apenas nos tratamentos submetidos a 20 e 25°C, e que a 25°C o tamanho das lesões foi maior que a 20°C. O período de incubação e de latência variaram de 11 a 16 dias. O patógeno requereu o mínimo de 8 h de período de molhamento foliar para o sucesso de sua infecção e a ferrugem foi mais severa em períodos de molhamento a partir de 12 h. A zona de maior favorabilidade de epidemia para ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar para o Estado de São Paulo é o Centro-norte. Esses resultados colaboram para o entendimento da epidemiologia da doença e favorecem subsídio para o seu manejo.

Palavras-chave: *Saccharum* spp.; Fungo; Epidemiologia; Ambiente; Mapa

ABSTRACT

Epidemiological aspects of orange rust of sugarcane

Sugarcane orange rust, caused by *Puccinia kuehnii*, was reported for the first time in Brazil in December of 2009. In countries where the disease already occurs, there were related damages around 40%. The objective of this study was: (i) to verify the spore germination under different temperatures *in vitro*; (ii) to verify the epidemiological aspects of orange rust under different leaf wetness duration and temperatures, *in vivo*, under controlled conditions; and (iii) to develop risk maps for the disease epidemic for Sao Paulo State. For spore germination, *in vitro*, water agar was poured on slides and spores suspension was spread on the media and kept under wet chamber for up to 22 h. In the *in vitro* evaluations, there was recorded the percentage of spore germination and the length of the germ tubes. For the *in vivo* experiment, pots with one-month-old plants of the susceptible variety CL85-1040 were inoculated and submitted to 36 treatments that represented the interaction of six temperatures (10, 15, 20, 25, 30 and 35°C) and six leaf wetness duration (0, 4, 8, 12, 18 and 24 h). This experiment was repeated twice. The severity of the disease was measured counting the number of lesions on the zero leaf. Diameter of lesions was also recorded on the last day of assessment. For the development of risk zones maps for the disease epidemic for Sao Paulo State, we used meteorological data from the years 2002 to 2005. Forecast models were used to create indexes and to calculate the percent of favorable days for the infection. The *in vitro* experiment shows that the urediniospores germinate at 10, 15, 20 and 25°C. However, the germ tube growth is faster as the temperature increases, reducing the growth as the temperature reaches 25°C or more. In the *in vivo* experiment, the disease just occurred at 20 and 25°C, and at 25°C the size of the lesions is superior than at 20°C. The incubation and latent period varied from 11 to 16 days, depending on the treatment. The pathogen required at least 8 h of leaf wetness duration for the success of the infection, and the disease was more severe at over 12 h of leaf wetness duration. The most favorable zone for orange rust epidemic in the Sao Paulo State is the North Central area.

Keywords: *Saccharum* spp.; Fungi; Epidemiology; Environment; Map

1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é uma das principais culturas no Brasil e já enfrentou grandes desafios fitossanitários mundialmente. Atualmente, a ferrugem alaranjada, causada pelo fungo *Puccinia kuehnii* (W. Krüger) E. J. Butler, é mais uma ameaça aos canaviais brasileiros.

A ferrugem alaranjada foi relatada na Ásia e na Austrália há muitos anos, e, neste último, na safra de 2000, foram observados danos de até 40% (MAGAREY; WILLCOX; CROFT; CORDINGLEY, 2001). Após sua constatação na Austrália, verificou-se a chegada da doença aos Estados Unidos da América (EUA) em 2007 (COMSTOCK et al., 2008); Guatemala (OVALLE; COMSTOCK; GLYNN; CASTLEBURY, 2008), Costa Rica, Nicarágua (CHAVARIA, 2009), México, El Salvador, Panamá (FLORES et al., 2009) e Cuba em 2008 (PÉREZ-VICENTE et al., 2009).

Observando-se a trajetória do patógeno a partir dos países do norte até a América Central, acreditava-se que haveria risco da rápida chegada de *P. kuehnii* à América do Sul. Em dezembro de 2009 foi relatada a presença da doença no Brasil, na cidade de Araraquara (BARBASSO et al., 2010). Atualmente a doença já está disseminada por todo o Estado de São Paulo e presente também nos Estados do Paraná, Mato Grosso do Sul, Espírito Santo, Goiás e Minas Gerais (CENTRO DE TECNOLOGIA CANAVIEIRA - CTC, 2010).

Como a ferrugem alaranjada é uma doença que começou a causar danos mundialmente em 2000 e, portanto, de importância recente, ainda há poucas informações sobre a epidemiologia da doença, as quais são necessárias para se estabelecer as condições, épocas e locais mais favoráveis à ocorrência da doença e locais de risco para plantio das variedades suscetíveis.

Para a ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar, que é uma doença de confirmada importância, de constante presença nos canaviais e com agente causal de fácil disseminação, é interessante que sejam construídos modelos epidemiológicos que permitam o mapeamento de zonas de risco da epidemia, o qual seria importante para a decisão da escolha da variedade a ser plantada.

Para o mapeamento de zonas de risco de epidemias de ferrugem alaranjada para o Estado de São Paulo é necessário que haja dados confiáveis do clima (temperatura e umidade) da região alvo de estudo. Além desses dados devem ser conhecidos o período de molhamento foliar e temperatura necessários para o desenvolvimento da doença, preferencialmente por meio de experimentos *in vivo*, da doença e não apenas do patógeno, o que traz maior confiança em extrapolar os dados para condições de campo.

Estudos preliminares *in vitro* com germinação de urediniósporos já foram desenvolvidos por Magarey; Neilsen e Magnani (2004), no entanto outras investigações ainda são requeridas para o entendimento das condições do desenvolvimento da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar.

Tendo em vista o contexto descrito, o objetivo deste estudo é dar continuidade a investigações já realizadas *in vitro* (MAGAREY; NEILSEN; MAGNANI, 2004), por meio de experimentos mais detalhados e também por meio de experimentos *in vivo*, estes para averiguar os períodos de incubação e latência, incidência, severidade e tamanho de lesões da doença sob diferentes temperaturas e sob diferentes períodos de molhamento foliar. A partir dos dados obtidos *in vivo*, será possível desenvolver mapas de zonas de risco de epidemias quanto à possível ocorrência de ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Revisão Bibliográfica

2.1.1 A cultura da cana-de-açúcar

O Brasil se destaca como o maior produtor de cana-de-açúcar, responsável por, aproximadamente, 37% da produção mundial (FAO, 2010). Com os mais baixos custos praticados na produção cana-de-açúcar, o Brasil se tornou o maior exportador mundial de açúcar e se prepara também para atender parte da grande demanda internacional de álcool para substituir os derivados de petróleo (FNP CONSULTORIA & COMÉRCIO, 2006).

Os rendimentos obtidos no Brasil são em torno de 80 t/ha, acima da média mundial (71 t/ha) (FAO, 2010), o que é resultado da implantação de tecnologias modernas no canavial. Dentre elas, o melhoramento genético que é focado na resistência a doenças, além de outras características agrônômicas. Há diversas doenças capazes de reduzir o rendimento da cana-de-açúcar e, por isso, são alvos de preocupação constante nos programas de melhoramento (HEINZ, 1987). As principais doenças da cana-de-açúcar, consideradas pelos programas de melhoramento genético, são: carvão, ferrugem marrom, mosaico, escaldadura, amarelinho e raquitismo.

A ferrugem marrom (*Puccinia melanocephala*) é um exemplo clássico da importância de doenças de cana-de-açúcar. Primeiramente relatada em julho de 1978 na República Dominicana, e devido a sua rápida progressão, foi encontrada posteriormente no Caribe, América Central e EUA (NAGARAJAN; SINGH, 1990). Essa doença foi encontrada pela primeira vez no Brasil em 1986, quando já havia 90% de variedades resistentes ao patógeno (TOKESHI; RAGO, 2005). Por esse motivo, *P. melanocephala* não causou grandes prejuízos em plantios comerciais, mas sabe-se que, onde encontrou variedades suscetíveis, causou até 50% de dano (GIGLIOTI et al., 1999). Nos EUA, há relato de danos da ordem de 10-40% (COMSTOCK; SHINE, 1992).

A ferrugem marrom é manejada por meio de resistência varietal no Brasil. A maioria das variedades é resistente e as poucas suscetíveis são alocadas em regiões

de clima não favorável para o desenvolvimento da doença. Atualmente, essa ferrugem ainda causa problemas por consequência de quebra de resistência em países onde os programas de desenvolvimento de variedades são pequenos ou que não têm programa de melhoramento próprio, contando com pequeno número de variedades disponíveis, como os casos dos EUA e Guatemala.

Recentemente outra ferrugem da cana-de-açúcar tem ameaçado os canaviais, a ferrugem alaranjada.

2.1.2 A ferrugem alaranjada

A ferrugem alaranjada é causada pelo fungo *Puccinia kuehnii* (W. Krüger) E.J. Butler, um basidiomiceto, da Classe *Teliomycetes*, Ordem *Uredinales*, Família *Puccinaceae* (HAUKSWORTH et al., 1995). Assim como os fungos causadores de ferrugens (SHAW, 1963), *P. kuehnii* é biotrófico e, portanto, não cultivado em meio de cultura.

A ferrugem alaranjada é prevalente em condições de verão úmido e a ferrugem marrom, na primavera (BRAITHWAITE, 2005; BRAITHWAITE et al., 2009). No entanto, por vezes, os sintomas de ferrugem alaranjada podem ocorrer concomitantes com os da ferrugem marrom e ambos podem ser confundidos. Por esse motivo, é importante que a sintomatologia seja bem conhecida, assim como a morfologia dos agentes causais (Figura 1).

Figura 1 – Ferrugem marrom: pústula (A), esporulação na pústula (B) e urediniósporo (C).
Ferrugem alaranjada: pústula (D), esporulação na pústula (E) e urediniósporo (F)

Duas particularidades do sintoma podem colaborar para a distinção das duas ferrugens no campo. A primeira característica importante é a coloração das pústulas; laranja claro quando ferrugem alaranjada e marrom escuro quando ferrugem marrom. Outra característica típica é que as pústulas produzidas por *P. kuehnii* são mais curtas e mais ovais do que as produzidas por *P. melanocephala* (GLYNN et al., 2010).

Além das particularidades dos sintomas, os esporos de ambos os patógenos também apresentam diferença morfológica. Os urediniósporos são as estruturas utilizadas para identificação da espécie pois são mais comuns na natureza.

Os urediniósporos de *P. melanocephala* são elípticos com parede celular uniforme em espessura e são de coloração marrom a marrom escuro. Os urediniósporos de *P. kuehnii* são normalmente ovóides ou piriformes, e alguns dos esporos têm em sua parte apical um espessamento leve a pronunciado da parede celular, ao redor de 5 µm ou mais; a coloração costuma variar de amarelo dourado a alaranjado (VIRTUDAZO; NOJIMA; KAKISHIMA, 2001; MORDUE, 1985). Mordue (1985) observou urediniósporos também sob microscópio eletrônico de varredura e verificou que as extremidades das paredes dos esporos de *P. melanocephala* são muito equinuladas e com agrupamentos de espinhos. Já as extremidades das paredes de *P. kuehnii* são parcialmente equinuladas e sem agrupamentos de espinhos.

A biologia molecular é mais uma ferramenta que possibilita a distinção entre essas duas ferrugens da cana-de-açúcar. Glynn et al. (2010) desenvolveram PCR convencional e PCR em tempo real para detectar *P. melanocephala* e *P. kuehnii* e conseguiram detectar os patógenos mesmo antes do desenvolvimento dos sintomas.

A ferrugem alaranjada está presente há anos nas regiões canavieiras da Austrália e Ásia (RYAN; EGAN, 1989), mas apenas gerou danos em 2000 com a epidemia iniciada a partir da quebra de resistência de uma das variedades mais plantadas na Austrália, a Q124. A situação que precedeu a epidemia foi a predominância de uma única variedade plantada (85%) na região central de Queensland. A gravidade da doença pôde ser observada pelo seu progresso rápido desde sua primeira constatação em janeiro de 2000, com o aumento do sintoma nas folhas e diminuição do rendimento (MAGAREY; NEILSEN; BULL, 2004). Na safra de

2000 foram observados danos de 40% na cultura e em 2001 foram registradas perdas de \$150 - 200 milhões de dólares australianos (MAGAREY et al., 2001).

Pesquisas com isolados de *P. kuehnii* da Austrália foram realizadas por Braithwaite et al. (2009), os quais compararam filogeneticamente 28 isolados provenientes de herbários feitos com plantas de campos comerciais, selvagens e de jardins, coletados da Austrália, Papua Nova Guiné, Indonésia e China. Estes autores encontraram três grupos filogenéticos, sendo que todos os isolados de campos comerciais da Austrália pertenciam ao mesmo grupo (grupo I), e isolados de canas selvagens e de jardins de Papua Nova Guiné e da Indonésia pertenciam a outros grupos (grupos II e III). Todos os grupos filogenéticos eram morfológicamente compatíveis a *P. kuehnii*. Por meio deste trabalho, pôde-se verificar a existência de variabilidade entre isolados de *P. kuehnii*, capazes de causar doença em diferentes tipos de plantas e desafios quarentenários para a Austrália, onde nem todos os grupos filogenéticos estão presentes. Outras investigações sobre filogenia e polimorfismo foram realizadas e encontrou-se alto polimorfismo entre isolados de *P. kuehnii* (VIRTUDAZO; NAKAMURA; KAKISHIMA, 2001a, 2001b).

Após a ferrugem alaranjada ser constatada causando epidemias na Austrália, a sua presença foi também verificada nos EUA em 2007, que foi o primeiro relato no continente americano (COMSTOCK et al., 2008). Nessa ocasião, causou danos significativos por atacar uma das variedades mais plantadas na Flórida, a CP80-1743 (SOOD; COMSTOCK; GLYNN, 2009). Segundo Dr. Richard Neil Raid¹ (informação verbal), da Universidade da Flórida, danos de até 40% foram verificados no ano de 2007 na variedade suscetível CL85-1040. Em 2008 a doença alcançou a Guatemala (OVALLE; COMSTOCK; GLYNN; CASTLEBURY, 2008), Costa Rica, Nicarágua (CHAVARIA, 2009), México, El Salvador, Panamá (FLORES et al., 2009) e Cuba (PÉREZ-VICENTE et al., 2009). Os sucessivos relatos da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar, em curto espaço de tempo nos diversos países, demonstra a alta eficiência da disseminação desta doença.

¹ Raid, R.N. **A synopsis of sugarcane orange rust epidemics during 2008 and 2009.** Belle Glade, 25 set. 2009. Palestra ministrada a 40th Annual Meeting: ASSCT Florida Division.

Visando compreender o movimento de *P. kuehnii* a partir da Austrália para o continente Americano, Glynn et al. (2010) verificaram a variabilidade deste patógeno nas diversas regiões com a presença da doença. Por meio de análises do polimorfismo na região ITS1 de *P. kuehnii*, encontraram que existem dois alelos de *P. kuehnii* (183A e 183G), e dentre esses alelos, apenas o 183A predomina no hemisfério Oeste. Estes autores explicitam que os programas de melhoramento devem focar em resistência a ambos os alelos, visando uma resistência mais durável. Também discutem que há duas possíveis formas da chegada do alelo 183A de *P. kuehnii* ao hemisfério Oeste: dispersão aérea a partir do hemisfério Leste ao hemisfério Oeste; ou transporte indevido de material vegetal com folhas infectadas, da Austrália e Ásia, seguido por rápida dispersão.

Observando-se a trajetória do patógeno a partir dos países do norte até a América Central, percebeu-se o risco da chegada de *P. kuehnii* ao Brasil. Caso essa possibilidade se concretizasse, a situação seria preocupante, pois a indústria canavieira na região centro-sul do país é semelhante à encontrada na Austrália no ano de 2000, com a predominância da variedade RB86-7515 nos Estados de São Paulo, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul (SANTOS et al., 2008). Essa variedade é resultado do cruzamento no qual um dos parentais é a variedade RB72-454 (HOFFMAN et al., 2008), que foi considerada suscetível, em ensaios realizados com 70 cultivares internacionais para resistência à ferrugem alaranjada (MAGAREY, 2007).

Outro aspecto preocupante era que as variedades resistentes à ferrugem marrom poderiam não ser resistentes à ferrugem alaranjada, como já observado na Guatemala (OVALLE et al., 2008). Esse fato demonstra a relevância de novas pesquisas, pois conhecimentos sobre a ferrugem marrom não podem ser extrapolados para a ferrugem alaranjada.

Em dezembro de 2009, a ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar foi encontrada no Brasil no município de Araraquara/SP. Atualmente essa doença já está presente em diversos municípios do Estado de São Paulo e também em alguns locais no Paraná, Mato Grosso do Sul, Espírito Santo, Goiás e Minas Gerais (CTC, 2010). Assim como na Guatemala, foi observado que há diferença de resistência das variedades brasileiras à ferrugem marrom e à ferrugem alaranjada. Segundo dados do Centro de

Tecnologia Canavieira (CTC, 2010), a grande maioria das variedades nacionais é considerada resistente à ferrugem alaranjada. As variedades RB85-5156 e CTC3 são consideradas intermediárias/suscetíveis e as SP89-1115, SP84-2025, RB72-454 e CV14, suscetíveis. A variedade RB86-7515, a mais plantada no Brasil, foi considerada suscetível no passado e após a chegada da doença no país, verificou-se que esta é resistente. Portanto, esta variedade não apresenta risco no momento.

Acredita-se que as variedades suscetíveis deixarão de ser plantadas em regiões favoráveis à doença. No entanto, ainda hoje não há trabalhos que mostrem como as variedades de resistência intermediária/suscetível reagem à doença e quanto aos possíveis danos. E mesmo com o desenvolvimento de trabalhos que mostrem a resposta de resistência das atuais variedades nacionais, segundo Braithwaite et al. (2009) e Magarey et al. (2001), clones resistentes podem aumentar sua suscetibilidade no tempo graças à variabilidade da população do patógeno, o que permite inferir que há possibilidade de ocorrência de raças do patógeno e que a resistência das variedades brasileiras pode mudar futuramente.

Diante do cenário atual, é interessante que se saiba como a ferrugem alaranjada se comportará em diferentes variedades de cana-de-açúcar, qual a variabilidade do patógeno e quais as condições climáticas que favorecem a doença, para assim evitar o plantio de variedades suscetíveis em locais potencialmente problemáticos.

2.1.3 Efeito das condições ambientais e elaboração de mapas de zona de risco de epidemia

Para doenças ocorrerem é necessário que haja um hospedeiro suscetível, um patógeno infectivo e o ambiente favorável, construindo o que se chama de “triângulo da doença”, onde os vértices são interdependentes (AGRIOS, 2005a). Portanto, em uma situação de hospedeiro suscetível e patógeno agressivo, o clima é que ditará o aparecimento da doença (AGRIOS, 2005a, COAKLEY; SCHERM; CHAKRABORTY, 1999). Literaturas mais antigas como a de Coakley (1988) já explicitam a importância do clima no ciclo das relações patógeno hospedeiro.

Epidemias históricas economicamente importantes foram relatadas devido a mudanças climáticas, como a requeima da batata na Irlanda em 1845; o ergotismo dos

cereais no Reno em 857 e na França em 994, 1089 e 1951; e a helmintosporiose do arroz em Bengala em 1942 (BERGAMIN FILHO; KIMATI, 1995).

Atualmente outras epidemias ocorrem no mundo, dentre elas as causadas por ferrugens. As ferrugens são doenças policíclicas, ou seja, necessitam de diversos ciclos de infecção para gerar epidemias (KRANZ, 2002a). Sabe-se que as condições climáticas são reconhecidamente importantes para esse tipo de doença, as quais determinarão o número de ciclos secundários que o patógeno terá no ciclo da cultura e, portanto, determinará também a intensidade da epidemia (AGRIOS, 2005b).

Para a compreensão do comportamento da doença em diferentes condições climáticas, podem ser construídos modelos matemáticos que expliquem a realidade complexa de epidemias. Na construção de modelos são necessários conhecimentos sobre a temperatura e a umidade que propiciam o desenvolvimento da doença, conhecimentos esses que servem como base para sistemas de previsão (DE WOLF; ISARD, 2007). Elementos meteorológicos como temperatura e umidade do ar (umidade relativa, período de molhamento foliar, precipitação) são aqueles que mais influenciam a ocorrência e o desenvolvimento das doenças (AGRIOS, 2005b; SENTELHAS et al., 2001; HUBER; GILLESPIE, 1992; YOUNG; PEScott; SAARI, 1978). Em fungos, por exemplo, esses dois fatores podem influenciar os processos de infecção, esporulação e colonização (HUBER; GILLESPIE, 1992).

Heber e Gillespie (1992) detalham que, assim como a temperatura, o período de molhamento foliar é uma variável fundamental para o entendimento de uma epidemia, e que na grande maioria os fitopatologistas determinam esses período usando câmaras de ambiente controlado. Esses mesmos autores explicam que, em campo, o período de molhamento foliar é de difícil determinação e pode variar de acordo com a quantidade de folhas, que influencia no período seco e úmido ao dossel da cultura.

No passado, para elaboração de modelos, comumente eram feitas comparações diretas entre dados epidemiológicos e meteorológicos por meio de curtas séries de dados climáticos não detalhados e uso de resultados do comportamento de patógenos de forma isolada, isso é, em laboratório (BOURKE, 1970). Segundo esse mesmo autor, comparação como a já citada deve ser evitada, pois há muito mais características que devem ser analisadas para prever satisfatoriamente uma doença. Teng e Yang

(1993) relatam que simulações de variáveis climáticas reais, em condições controladas, são maneiras de se coletar dados para predizer o comportamento da doença no campo. Kranz (2002a) comenta que a maioria das características do monociclo e observação do desenvolvimento de doenças é estudado por experimentos em condições controladas.

Tomerlin et al. (1983), por meio de ensaios em condições controladas com plantas de trigo e *Puccinia recondita* f. sp. *tritici*, mostraram que a temperatura influencia a produção de esporos, o período infeccioso e o período latente. Temperaturas entre 21 e 29°C resultam em períodos latente e infeccioso mais curtos comparado a temperaturas mais baixas.

Modelos epidemiológicos foram utilizados por Alves (2007) com a ferrugem asiática da soja, em estudos *in vitro* (germinação e emissão de apressório) e *in vivo* (frequência de infecção, severidade e período latente), sob condições controladas. A faixa de temperatura entre 15 e 25°C mostrou ser ideal para a germinação de uredinióporos de *Phakopsora pachyrhizi*, embora germinem de 8 a 30°C. Observações *in vivo* mostraram que o período mínimo de molhamento foliar para ocorrer a infecção na planta de soja é de 6 h e que esse período influencia a frequência de infecção e a severidade da doença. Esse mesmo autor relatou também que depois de estabelecida a infecção, as temperaturas de 23 a 30°C não influenciam a frequência de infecção, severidade e período latente, mas que temperaturas constantes maiores ou iguais a 35°C impedem a colonização pelo patógeno.

A partir de modelagens epidemiológicas, pode ser desenvolvido mapeamento de zonas de risco de epidemias de doenças e conhecer a probabilidade que certa incidência ou severidade da doença alcançará (KRANZ, 2002a). Esse tipo de mapeamento foi iniciado com estudos geofitopatológico sem uma escala geográfica, dividindo-se o risco em alto, médio ou esporádico (WELTZIEN, 1972). Para esse mapeamento, devem ser obtidos parâmetros epidemiológicos e também dados das condições climáticas (temperatura, umidade relativa e pluviosidade) prevalentes da área de interesse (AGRIOS, 2005b; KRANZ, 2002b).

Trabalho com mapeamento de zonas de risco foi desenvolvido por Del Ponte et al. (2006). Esses autores transformaram dados de período de molhamento foliar e

temperatura em uma função matemática e utilizaram dados climatológicos de uma série de seis anos do Estado do Paraná para construir um mapa de risco de epidemia de ferrugem asiática da soja para este Estado. A partir do mapa, puderam identificar regiões mais favoráveis para o desenvolvimento da doença.

Hamada et al. (2008) estudaram o risco climático do míldio da videira no Estado de São Paulo. Para tal, adotaram um modelo não linear, baseado na relação da temperatura, no período de molhamento foliar e na eficiência de infecção (número de lesões/cm²), e obtiveram uma função. Relacionaram a função obtida pelo modelo aos dados climáticos do Estado de São Paulo de uma série de 43 anos e, então, foram gerados os mapas de zonas de risco de epidemia da doença.

Mapeamentos de zonas de risco de epidemia provenientes de dados epidemiológicos também foram realizados para outras doenças, entre elas, pinta preta e podridão floral dos citros (LOPES, 2007), cancro cítrico (LOPES et al., 2008) e ferrugens do milho (HAMADA et al., 2009).

Para a ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar, que é de recente importância econômica mundial, estão sendo iniciados trabalhos que relacionam a doença e o clima. Experimentos de germinação de urediniósporos *in vitro* em diferentes temperaturas e umidades relativas foram elaborados por Magarey; Neilsen e Magnani (2004). A partir destes experimentos foi construído um modelo preliminar de desenvolvimento da doença em diferentes regiões da Austrália (STAIER; MAGAREY; FINLAYSON, 2004), o qual, segundo esses mesmos autores, poderia evoluir para predições de incidência e de severidade da doença, se fossem refinadas as investigações sobre a influência da temperatura e da umidade.

Como mapas de risco de epidemia dependem de predições de severidade de doença, informações complementares a respeito da epidemiologia da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar, como período de incubação, período de latência e desenvolvimento da doença sob diferentes temperaturas e períodos de molhamento foliar ainda são necessários.

2.2 Material e Métodos

Os experimentos foram realizados no Everglades Research and Education Center (University of Florida) em Belle Glade, e na estação de cana-de-açúcar do USDA (United States Department of Agriculture) em Canal Point, na Flórida, nos Estados Unidos.

Esta secção está dividida em três estudos: 2.2.1) Germinação de urediniósporos e comprimento de tubo germinativo sob diferentes temperaturas; 2.2.2) Efeito da temperatura e do período de molhamento foliar sobre a infecção, período de incubação e período de latência da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar; 2.2.3) Mapas de zonas de risco de epidemias quanto a possível ocorrência de ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo.

2.2.1 Germinação de urediniósporos e comprimento de tubo germinativo sob diferentes temperaturas

Seis caixas de ponteiros P1000 serviram como câmaras úmidas, conforme método descrito por Braithwaite (2005) (Figura 2), cada uma contendo três lâminas, sob as quais verteram-se 500 μL de ágar-água e, depois de solidificado, distribuíram-se 50 μL de suspensão de urediniósporos (concentração de 10^5 esporos/mL). As caixas foram mantidas em seis diferentes temperaturas (10, 15, 20, 25, 30 e 35°C). Após 8, 12 e 22 h de incubação, uma das três lâminas de cada tratamento foi retirada e levada para leitura da porcentagem de germinação e do comprimento médio de 10 tubos germinativos por meio de escala micrométrica na ocular de um microscópio composto. As lâminas foram descartadas imediatamente após a leitura. Foi considerado germinado o urediniósporo que apresentou comprimento do tubo germinativo superior ao seu tamanho. Esse experimento foi repetido duas vezes e cada repetição foi tratada como bloco para a análise estatística. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado.

Figura 2 – Método utilizado para câmara úmida de lâminas. Caixa de ponteira P1000, com 100 mL de água no fundo, lâminas (com 500 μ L de meio ágar-água) sobre suporte interno e suspensão de urediniósporos sobre o meio

2.2.2 Efeito da temperatura e do período de molhamento foliar sobre a infecção, período de incubação e período de latência da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar

Os toletes utilizados nesse experimento foram provenientes da variedade comercial CL85-1040, variedade suscetível à ferrugem alaranjada e produzida na Flórida pelo programa de melhoramento do USDA.

As plantas foram produzidas por plantio de dois toletes de uma “gema” em vasos de 25 cm de diâmetro, contendo terra orgânica (*muck*), em casa de vegetação. Plantas, de aproximadamente um mês, com a folha bandeira aberta, foram inoculadas.

Para o preparo do inóculo, folhas de plantas doentes no campo foram coletadas e os urediniósporos de *P. kuehnii* foram extraídos dessas folhas com auxílio de bomba a vácuo e coletor de vidro (Figura 3). A viabilidade desses esporos foi verificada por meio do método descrito por Braithwaite (2005) modificado. Os urediniósporos foram diluídos em solução de 1-nonanol 98% (concentração de 0,002%), conforme Sood, Comstock e Glynn (2009), e calibrados por meio de hemacitômetro (Câmara de Neubauer) para uma concentração de 10^5 esporos/mL.

Figura 3 – Equipamento utilizado na coleta de esporos: bomba a vácuo e coletor de vidro

A inoculação foi realizada por meio de aspersão da suspensão de inóculo, o que proporcionou um filme de água, isto é, gotas regularmente distribuídas na superfície abaxial e adaxial das folhas. Para cada conjunto de três plantas (repetições), que constituíram um tratamento, foram pulverizados 42 mL da suspensão de esporos. Imediatamente após a inoculação, as plantas foram cobertas com uma armação de arame fechada por sacos de poliestireno e presos hermeticamente por meio de elásticos de borracha, impedindo a troca de ar com o ambiente externo e a evaporação da suspensão de inóculo (Figura 4A). O uso dos sacos de poliestireno preso hermeticamente proporcionou a condição de câmara úmida ou período de molhamento foliar (segundo definição de Huber e Gillespie (1992)). Posteriormente, as plantas foram transferidas para câmara de crescimento do tipo BOD, calibradas individualmente para temperaturas de 10, 15, 20, 25, 30 e 35°C. Em cada temperatura as plantas foram submetidas a seis períodos de molhamento foliar: 0, 4, 8, 12, 18 e 24 h. A duração do período de molhamento foliar de 0 h correspondeu à ausência de câmara úmida após a inoculação. Após o período correspondente a cada molhamento foliar, as câmaras úmidas foram retiradas de cada tratamento (Figura 4B).

Durante as primeiras 24 h, as câmaras de crescimento foram mantidas em escuro contínuo, quando, então, foram calibradas para fotoperíodo (12 h luz branca fluorescente/12 h escuro).

Figura 4 – Método de câmara úmida (período de molhamento foliar) (A) e superfície foliar após retirada da câmara úmida (B)

A combinação das temperaturas (10, 15, 20, 25, 30 e 35°C) e dos período de molhamento foliar (0, 4, 8, 12, 18 e 24 h), resultou em 36 tratamentos. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, com três repetições por tratamento.

Após a inoculação, as plantas foram observadas diariamente quanto ao aparecimento de sintomas. Ao ser verificado o primeiro sintoma, a folha zero de cada uma das plantas foi avaliada, em intervalos de três dias quanto ao número de lesões. Essas avaliações terminaram com a estabilização do número de lesões. No último dia de avaliação, as folhas avaliadas foram recortadas e o tamanho das pústulas foi medido sob lupa digital.

Nesse estudo, o período de incubação foi definido quando 50% das plantas apresentaram sintoma da doença e o período de latência quando 50% das plantas apresentaram ao menos uma pústula esporulando.

Esse experimento foi repetido duas vezes. A primeira repetição foi iniciada em 03 de novembro de 2009 e a segunda em 11 de dezembro de 2009.

2.2.2.1 Análise de dados

No experimento *in vitro*, os dados de germinação de urediniósporos e de comprimento de tubo germinativo foram submetidos a análise de variância e as médias foram comparadas pelo Teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. Para análise de variância, os dados do comprimento de tubos germinativos foram primeiramente transformados em $\sqrt{x+0,5}$

O efeito de cada uma das combinações de temperatura e período de molhamento foliar pelo número de lesões na folha foi descrito pelo modelo monomolecular $Y=b_1 [1-b_2 \exp(-b_3 M)]$, onde Y representa o número de lesões por folha, M é o período de molhamento foliar, e b_1 , b_2 e b_3 são parâmetros a serem estimados (MADDEN; HUGHES; VAN DEN BOSCH, 2007; CAMPBELL; MADDEN, 1990). Dentre os parâmetros estimados pelo modelo, b_1 representa a assíntota da curva, b_2 , o inóculo inicial e b_3 a taxa de progresso da doença. Esses três parâmetros foram comparados pelo teste t para verificar se diferiram entre os tratamentos.

Para confirmação do ajuste do modelo monomolecular aos dados obtidos foram verificados: significância dos parâmetros, coeficientes de determinação (R^2), valores de resíduos (incidência observada menos incidência prevista) próximos ao eixo zero e presença ou ausência de padrão. Os critérios R^2 e valor de resíduos são considerados os mais importantes na escolha de um modelo (BERGAMIN FILHO, 1995; BERGAMIN FILHO; AMORIN, 1996; MADDEN; HUGHES; VAN DEN BOSCH, 2007).

O modelo beta-monomolecular (HAU; KRANZ, 1990) foi ajustado às médias de cada variável, por regressão não linear, para descrever a influência da temperatura e do período de molhamento foliar combinados. O modelo beta-monomolecular é representado pela equação: $Z = b_1 \{[(T - b_2)^{b_3}(b_4 - T)^{b_5} b_6 [1 - b - b_7 \exp(-b_8 M)]]\}$, onde b_2 e b_4 representam as temperaturas mínima e máxima, respectivamente, para o

desenvolvimento da doença, b_1 , b_3 , b_5 , b_6 , b_7 e b_8 são parâmetros a serem estimados, T é a temperatura, M é a duração do molhamento foliar, e Z é a densidade de lesões. A partir da equação gerada pelo gráfico de superfície foram desenvolvidos mapas de zonas de risco de epidemias para a ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo.

Para ambos os ajustes, monomolecular e beta-monomolecular, foi utilizado o programa STATISTICA (2001) (StatSoft, Inc.) como ferramenta.

2.2.3 Mapas de zonas de risco de epidemias quanto a possível ocorrência de ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo

2.2.3.1 Região de estudo e obtenção dos dados

O mapa de risco de epidemia foi desenvolvido para o Estado de São Paulo que ocupa uma área de 248.209,4 km² e é dividido em 645 municípios (IBGE, 2010). Desta extensão, foram analisados dados meteorológicos dos anos de 2002 a 2005, de estações automáticas de 27 municípios, fornecido pelo Instituto Agrônomo de Campinas (IAC). Nesses dados constavam temperatura, umidade relativa, precipitação e o molhamento foliar horário em todos os dias do ano para cada um dos municípios apresentados na Tabela 1. Os dados meteorológicos foram corrigidos por meio de extrapolação com a estação mais próxima, quando apresentaram ausências de informações nas séries diárias, utilizando distância Euclidiana. Esses mesmos dados meteorológicos foram utilizados por Lopes (2007) para mapeamento de zonas de risco de epidemias para doenças de citros no Estado de São Paulo.

Tabela 1 – Municípios do Estado de São Paulo em que se localizavam as estações meteorológicas automáticas utilizadas para obtenção dos dados climáticos e características de suas latitudes, longitudes e altitudes

Cidade	Latitude	Longitude	Altitude
Adamantina	21° 41' Sul	51° 50' Oeste	443m
Atibaia	23° 07' Sul	46° 34' Oeste	805m
Auriflama	20° 41' Sul	50° 34' Oeste	420m
Bragança Paulista	22° 58' Sul	46° 33' Oeste	804m
Campinas	22° 54' Sul	47° 05' Oeste	669m
Cananéia	25° 01' Sul	47° 56' Oeste	10m
Jacupiranga	24° 41' Sul	48° 00' Oeste	200m
Jales	20° 16' Sul	50° 34' Oeste	484m
Jaú	22° 17' Sul	48° 34' Oeste	580m
Jundiaí	23° 12' Sul	46° 53' Oeste	715m
Manduri	23° 00' Sul	49° 19' Oeste	700m
Miracatu	24° 17' Sul	47° 28' Oeste	25m
Mococa	21° 28' Sul	47° 01' Oeste	665m
Monte Aprazível	20° 46' Sul	48° 39' Oeste	480m
Monte Alegre do Sul	22° 41' Sul	46 ° 43' Oeste	777m
Nova Odessa	22° 47' Sul	47° 27' Oeste	541m
Pindamonhangaba	22° 55' Sul	45° 27' Oeste	560m
Pindorama	21° 13' Sul	48° 53' Oeste	562m
Ribeirão Preto	21° 11' Sul	47° 48' Oeste	621m
Sta. Fé do Sul	20° 13' Sul	50° 57' Oeste	357m
São João da B. Vista	21° 58' Sul	46° 48' Oeste	766m
Sumaré	22° 50' Sul	47° 16' Oeste	547m
Taquarituba	23° 32' Sul	49° 15' Oeste	600m
Tatuí	23° 22' Sul	47° 52' Oeste	600m
Ubatuba	23° 27' Sul	45° 04' Oeste	8m
Vargem	22° 54' Sul	46° 25' Oeste	835m
Votuporanga	20° 25' Sul	49° 59' Oeste	505m

A partir da equação obtida pela análise dos dados correlacionando severidade de doença e as combinações entre período de molhamento foliar e temperatura, foram gerados índices de favorabilidade para a ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar. Esses índices foram desenvolvidos aplicando-se a equação aos dados climáticos diários dos municípios relacionados, utilizando programação desenvolvida em Visual Basic®. A partir dos índices, foi estabelecido arbitrariamente um intervalo de

favorabilidade considerando-se os dias com índices maiores que zero como favoráveis à ocorrência da doença. Para melhor visualização foram calculadas porcentagens de dias favoráveis para os anos de 2002, 2003, 2004 e 2005 e gerados mapas para cada ano. Também foi construído um mapa para a média de favorabilidade de todos estes anos. Para o mapeamento foi utilizado o programa MapInfo Professional Versão 10.5 e os dados cartográficos do Estado de São Paulo foram adquiridos do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística).

2.3 Resultados

2.3.1 Germinação de urediniósporos e tamanho de tubo germinativo sob diferentes temperaturas

Os urediniósporos germinaram a 10, 15, 20 e 25°C. A 30 e 35°C os esporos não germinaram nem mesmo após 22 h de incubação (Tabela 2 e Figura 5). Nessa mesma tabela pode-se notar que em 8 h de incubação os tratamentos 10, 15, 20 e 25°C não se diferenciam, mas após 12 h nota-se que os tratamentos 15 e 20°C tornam-se estatisticamente superiores aos demais, mostrando que 15 a 20°C é a faixa ótima de germinação dos urediniósporos de *P. kuehnii*.

Tabela 2 – Germinação (%) de urediniósporos de *P. kuehnii* submetidos às temperaturas de 10, 15, 20, 25, 30 e 35°C

Incubação (h)**	Temperatura (°C)						CV (%)
	10	15	20	25	30	35	
8	12 Aab	20 Aab	31,5 Aa	18,6 Aab	0 Ab	0 Ab	46,66
12	16 Ab	33 Aa	27 Aa	16,3 Ab	0 Ac	0 Ac	12,32
CV (%)	8	18,8	22,4	30,4	0	0	-

* Médias seguidas por letras minúsculas iguais nas linhas e maiúsculas nas colunas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

**Urediniósporos também foram observados após 22 h de incubação, porém, para os tratamentos 15, 20 e 25°C os tubos germinativos estavam muito longos, o que impossibilitou contagem da germinação. Após 22 h de incubação ainda não havia germinação dos urediniósporos a 30 e 35°C.

Figura 5 – Germinação de urediniósporos de *P. kuehnii* submetidos a diferentes períodos de incubação a temperaturas. Oito horas de incubação, nas temperaturas de 10, 15, 20, 25, 30 e 35°C (A a F, respectivamente). Doze horas de incubação nas temperaturas de 10, 15, 20, 25, 30 e 35°C (G a L, respectivamente). Observação em microscópio óptico, aumento de 4x, barra corresponde a escala utilizada para todas as figuras

Na Tabela 3 pode-se observar o desenvolvimento do tubo germinativo nas diferentes temperaturas. Nota-se que, assim como na germinação, o crescimento do tubo germinativo é maior também na temperatura de 20°C, seguido de 15 e 25°C e, por fim, 10°C.

As porcentagens de germinação em 15 e 20°C não diferiram estatisticamente em 8 e 12 h de incubação. Contudo, a temperatura de 20°C favorece o crescimento do tubo germinativo. Com o aumento da temperatura para 25°C, após 12 h de incubação, o crescimento do tubo germinativo é menor, assim como para temperaturas mais baixas que 20°C.

Tabela 3 – Comprimento (µm) de tubos germinativos de urediniósporos de *P. kuehnii* submetidos às temperaturas de 10, 15, 20, 25, 30 e 35°C

Incubação (h)**	Temperatura (°C)						CV (%)
	10	15	20	25	30	35	
8	155 Bc*	273 Bb	340 Ba	295 Aab	0 Ad	0 Ad	17,56
12	306 Ac	398 Ab	486 Aa	304 Abc	0 Ad	0 Ad	13,29
CV (%)	10,3	13,2	12,5	11,1	0	0	-

*Médias seguidas por letras minúsculas iguais nas linhas e maiúsculas nas colunas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Médias transformadas para $\sqrt{x+0,5}$.

**Urediniósporos também foram observados após 22 h de incubação, porém, para os tratamentos 15, 20 e 25°C os tubos germinativos estavam muito longos, o que impossibilitou a medida do comprimento do tubo germinativo. Após 22 h de incubação ainda não havia germinação dos urediniósporos a 30 e 35°C.

2.3.2 Efeito da temperatura e do período de molhamento foliar sobre a infecção, período de incubação e período de latência da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar

Com 11 dias após a inoculação, iniciou-se o aparecimento de sintomas (Figura 6). As lesões iniciaram-se pequenas, escurecidas e esporulantes na variedade estudada (CL85-1040). Com o passar do tempo, as lesões tornaram-se maiores. As pústulas apareceram em ambas as faces das folhas, com a maioria na parte abaxial (Figura 7).

Figura 6 - Sintomas de ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar: sintoma em planta inoculada (A);
pústulas em microscópio estereoscópico (B)

Figura 7 – Pústula na face adaxial (A) e abaxial (B) da folha de cana-de-açúcar

Com os dados obtidos estabeleceram-se período de incubação e de latência da ferrugem alaranjada, na variedade estudada. O período de incubação variou de 11-16 dias e o período de latência foi o mesmo que período de incubação (Tabela 4), isto é, as lesões iniciavam já esporulantes. Dentre os tratamentos, houve desenvolvimento de sintomas apenas nas temperaturas de 20 e 25°C e, portanto, na tabela, estão apresentados apenas os dados dessas duas temperaturas. Os períodos de incubação e de latência, na maioria dos tratamentos, diminuíram conforme aumentaram a temperatura e o período de molhamento foliar.

Tabela 4 – Período de latência e de incubação (dias) em plantas submetidas às temperaturas de 20 e 25°C, sob diferentes períodos de molhamento foliar (PMF)

PMF (h)	20°C	25°C
0	-(a)	-
4	-	-
8	16	11
12	11	11
18	13	11
24	13	11

^(a) A 0 e 4 h de PMF não houve desenvolvimento da doença.

Na Figura 8 observa-se que as duas únicas temperaturas que promoveram o desenvolvimento da doença foram 20 e 25°C e, nessas temperaturas, o período mínimo de molhamento foliar requerido para infecção foi de 8 h. Temperaturas abaixo de 20°C e acima de 25°C não favoreceram o patógeno, impedindo seu desenvolvimento mesmo quando submetidos aos período de molhamento foliar favoráveis ao desenvolvimento da doença.

O número de pústulas por folha não diferiu estatisticamente entre os tratamentos de 20 e 25°C nos períodos de molhamento foliar de 12 a 24 h. Em 8 h de período de molhamento foliar houve o desenvolvimento da doença, porém o número de

pústulas foi baixo. Conforme se aumenta o período de molhamento foliar de 8 para 12 h, aumenta-se também o número de pústulas. Ao serem analisados os erros dos pontos, verifica-se que não houve acréscimo de número de pústulas de 12 h para 18 e 24 h. No entanto, observa-se que a área das pústulas (Tabela 5) aumenta em função do aumento da temperatura para a maioria dos períodos de molhamento foliar. As pústulas no tratamento com 24 h de período de molhamento foram menores que no tratamento com 18 h de molhamento.

Figura 8 - Número de pústulas (%) nas temperaturas de 10, 15, 20, 25, 30 e 35°C sob os períodos de molhamento foliar (PMF) de 8, 12, 18 e 24 h

Tabela 5 – Área média (mm²) de pústulas de plantas submetidas às temperaturas de 20 e 25°C, sob diferentes períodos de molhamento foliar

Área média de pústulas (mm)			
PMF ^(a)	20°C	25°C	CV (%)
0h	a.s. ^(b)	a.s.	-
4h	a.s.	a.s.	-
8h	0,56 Aa ^(c)	1,82 Aab	33,15
12h	0,85 Ba	1,84 Aab	23,55
18h	0,55 Ba	3,08 Aa	15,05
24h	0,60 Ba	1,15 Ab	9,23
CV (%)	10,8	25,24	-

^(a)PMF = Período de molhamento foliar.

^(b)a.s. = ausência de sintoma.

Nota: dentre os tratamentos, houve desenvolvimento de sintomas apenas nas temperaturas de 20 e 25°C e, portanto, na tabela, estão apresentados apenas os dados dessas duas temperaturas.

^(c)Médias seguidas por letras minúsculas iguais nas colunas e maiúsculas nas linhas, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Na Figura 9 observa-se que as curvas de progresso da doença são descritas pelo modelo monomolecular, o qual apresentou bom ajuste aos dados e valores de resíduo próximo ao eixo zero (Tabela 6), com exceção dos tratamentos 8 h de molhamento foliar, quando não houve ajuste, provavelmente devido ao baixo número de lesões.

Pela Tabela 6 nota-se que o parâmetro b_3 (taxa de progresso da doença) varia conforme o tratamento, no entanto, devido a grande variação das assíntotas (b_1) as taxas não podem ser comparadas. Portanto, neste caso, as assíntotas são o parâmetro para melhor comparação, e neste caso, os tratamentos 18 h a 20°C, 18 h a 25°C e 24 h a 25°C foram superiores aos demais, seguidos de 12 h a 20 e 25°C e, posteriormente, de 24 h a 20°C.

Tabela 6 – Parâmetros estimados pelo modelo monomolecular ajustados aos dados de número de pústulas de ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar em tratamentos combinados de temperatura e período de molhamento foliar

Tratamentos	R^2 ^(a)	b_1 ^(b)	Erro _{b1} ^(c)	b_2	Erro _{b2}	b_3	Erro _{b3}	Padrão de resíduo
Monomolecular								
8 h 20°C	-(d)	-	-	-	-	-	-	-
8 h 25°C	-	-	-	-	-	-	-	-
12 h 20°C	0,99	42,27 c	1,24	-19,43 c	2,33	0,06 d	0,00	Não
12 h 25°C	0,99	46,72 b	0,97	-57,46 b	9,15	0,11 b	0,00	Não
18 h 20°C	0,99	54,34 abc	1,86	-268,22 a	55,19	0,16 a	0,01	Não
18 h 25°C	0,96	50,07 a	3,58	-136,74 abc	95,75	0,15 abc	0,04	Não
24 h 20°C	0,99	35,20 d	2,24	-69,27 b	17,59	0,11 abcd	0,18	Não
24 h 25°C	0,99	59,86 a	5,38	-39,53 bc	12,73	0,07 cd	0,01	Não

^(a) Coeficiente de determinação obtido pelo modelo.

^(b) b_1 , b_2 e b_3 – b_1 referem-se a quantidade máxima de doença (assíntota) ; b_2 é o parâmetro relacionado ao inóculo inicial (y_0) pela equação $b_2=(b_1-Y_0)/b_1$, considerando os valores em proporção; e b_3 é a taxa de progresso da doença, estimada pelo modelo.

^(c) Erro obtido para os parâmetros do modelo. Para todos os parâmetros comparáveis $p<0,05$
Colunas seguidas das mesmas letras, dentro de cada tratamento, não diferem entre si pelo teste t ($p<0,05$).

^(d) Baixa severidade da doença impediu o ajuste ao modelo monomolecular.

Figura 9 – Curvas de progresso da doença nas temperaturas de 20 e 25°C sob diferentes períodos de molhamento foliar (8, 12, 18 e 24 h)

O modelo beta-monomolecular foi ajustado à combinação dos dados de temperatura e de período de molhamento foliar, o que permitiu calcular a superfície de resposta para a variável porcentagem de número de lesões na folha e a equação da superfície foi encontrada (Figura 10). Essa equação foi utilizada para o mapeamento de zonas de risco de epidemia de ferrugem alaranjada. Os parâmetros do modelo não foram submetidos ao teste t, tendo em vista a faixa estreita de temperaturas que

viabilizou o desenvolvimento da doença. Por essa razão, o ajuste ao modelo foi medido pelo coeficiente de determinação R^2 .

Figura 10 – Superfície de resposta do número de pústulas (%) de *P. kuehni* em função da temperatura e do período de molhamento foliar, descrita pela função $Z = ((0.131897) * ((T - (14.5739))^{(1.95205)} * (((30.) - T)^{(1.6035)}))) * ((0.46151) * (1 - (1.08991) * \exp(-(0.047827) * M)))$, onde T é a temperatura (°C), M é a duração do molhamento foliar, e Z é o número de lesões (%). Coeficiente de determinação $R^2 = 0,84$

2.3.3 Mapas de zonas de risco de epidemias quanto a possível ocorrência de ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo

Nas Figuras de 11 a 15 estão os mapas de zonas de risco de epidemias de ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar, mostrando a porcentagem de dias favoráveis ao desenvolvimento da doença. Dentre esses mapas, estão aqueles individuais para os anos de 2002, 2003, 2004 e 2005 (Figuras 11, 12, 13 e 14, respectivamente) e um mapa que representa a média da favorabilidade desses quatro anos (Figura 15).

A estimativa da porcentagem de dias favoráveis para a ocorrência de ferrugem alaranjada variou conforme as regiões do Estado de São Paulo e entre os anos analisados. Nos mapas anuais, observa-se que uma área de alta variação da favorabilidade para com a doença é a região de Pindorama. Em 2002 essa região foi de mediana favorabilidade ($\pm 56\%$); em 2003, de baixa ($\pm 29\%$); em 2004, de alta ($\pm 98\%$); em 2005, média favorabilidade novamente. Outra área de variabilidade anual é o extremo Leste paulista que em 2002 e em 2003 apresentou baixa favorabilidade da doença e em 2004 e 2005 apresentou alta favorabilidade. Para as demais áreas, não foi observada grande variação de favorabilidade entre os anos.

De uma maneira geral, a região Sul do Estado, englobando parte do litoral paulista (Sudeste) e parte da fronteira do Estado com o Paraná, apresentou alta favorabilidade para a ferrugem alaranjada. No Centro Sul do Estado, na região de Piracicaba e de Jaú, há zonas de alto risco para a doença. No Centro Norte paulista também são encontradas áreas de média a alta favorabilidade (maior que 50%). O Noroeste apresenta favorabilidade mais baixa, em torno de 30%.

Figura 11 – Porcentagem de dias favoráveis à ocorrência de ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo durante o ano de 2002

Figura 12 – Porcentagem de dias favoráveis à ocorrência de ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo durante o ano de 2003

Figura 13 – Porcentagem de dias favoráveis à ocorrência de ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo durante o ano de 2004

Figura 14 – Porcentagem de dias favoráveis à ocorrência de ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo durante o ano de 2005

Figura 15 – Porcentagem média de dias favoráveis à ocorrência de ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo durante os anos de 2002 até 2005

2.4 Discussão

A importância do clima relacionado ao desenvolvimento de doenças tem sido intensivamente estudada, tendo como objetivo, entre outros, a compreensão da epidemiologia de doenças; a elaboração de sistemas de previsão de epidemias; e por meio desses conhecimentos, controlar efetivamente as doenças.

A ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar é de importância recente e a pesquisa contemporânea está proporcionando conhecimentos básicos sobre essa doença. Observações feitas em campo levaram a opiniões que estão sendo colocadas em avaliação científica atualmente.

O presente trabalho ilustra como as condições climáticas podem favorecer ou impedir o desenvolvimento de *P. kuehnii* e como afetam a germinação de urediniósporos, o crescimento do tubo germinativo e o aparecimento da doença.

Sabe-se que a ferrugem alaranjada é prevalente em condições de verão úmido e a ferrugem marrom ocorre mais na primavera (BRAITHWAITE, 2005, BRAITHWAITE et al., 2009). Mesmo sabendo-se que ambos patógenos causadores dessas ferrugens são do mesmo gênero e especializadas em um mesmo hospedeiro, Eversmeyer e Kramer (2000) discutem a possibilidade de ferrugens de um mesmo hospedeiro poderem apresentar adaptabilidades diferentes para temperaturas. Um exemplo que esses autores discutem são as três ferrugens que infectam o trigo. A ferrugem do colmo do trigo é considerada uma doença de temperaturas altas, enquanto a ferrugem das folhas é considerada de temperaturas médias e a ferrugem amarela, de temperaturas mais baixas.

Portanto, as ferrugens da cana-de-açúcar são mais um exemplo da diferença de adaptação climática por ferrugens de um mesmo hospedeiro. Por saber-se que a ferrugem alaranjada é uma doença que prevalece em verão úmido, acreditava-se que altas temperaturas favorecessem seu desenvolvimento. No entanto, resultados *in vitro* do presente estudo indicaram que urediniósporos de *P. kuehnii* são capazes de germinar apenas sob temperaturas amenas (10, 15, 20 e 25°C). A temperatura que mais favoreceu a germinação após 8 h de incubação foi a de 20°C, sendo que, após 12 h de incubação, 15 e 20°C foram as mais favoráveis. Portanto, a 20°C a germinação foi mais rápida que a 15°C. A 30 e 35°C não foi constatada germinação dos

urediniósporos mesmo após 22 h de incubação, o que mostra que essas temperaturas são nocivas ao patógeno. Dados semelhantes *in vitro* foram encontrados por Magarey; Neilsen e Magnani (2004), os quais mostraram que a faixa ótima de germinação de *P. kuehnii* está entre 17 a 24°C e que a umidade relativa mínima para a germinação é de 97%.

O fato de não haver germinação de urediniósporos de *P. kuehnii* a 30 e 35°C contradiz o que se esperava para uma doença de verão, pois as temperaturas diurnas dos países onde a doença causa danos atingem facilmente essa faixa. É provável, portanto, que o processo infectivo para esta doença ocorra à noite, quando a temperatura oscila ao redor de 20°C.

Faixa de temperatura de germinação de urediniósporos próxima à encontrada neste trabalho também foi relatada para outras ferrugens como, por exemplo, para *Phakopsora pachyrhizi* (KOCHMAN, 1979) e para *Hemileia vastatrix* (MEIRA; RODRIGUES; MORAES, 2008).

Outro aspecto observado quanto à germinação de *P. kuehnii* é que apenas um tubo germinativo é emitido por urediniósporo, diferente, por exemplo, da ferrugem do café, que pode emitir dois ou três tubos germinativos simultaneamente (KUSHALAPPA; ESKES, 1989).

Conforme observado no experimento *in vitro*, embora o urediniósporo tenha germinado de 10 a 25°C, a temperatura de 20°C favoreceu a germinação mais do que as demais temperaturas; e a 20 e 25°C houve maior crescimento do tubo germinativo em menor tempo de incubação (8 h) que as demais temperaturas. Isto permite inferir que estas duas temperaturas poderiam se sobressair quanto à infecção na planta. No entanto, isto só pode ser respondido por meio de experimento *in vivo*.

No experimento *in vivo*, foi observado que o período de incubação e o período de latência coincidiram para a variedade estudada (CL85-1040), pois, assim que as lesões tornavam-se visíveis nas folhas, já havia presença de esporulação. Os períodos de incubação e de latência variaram de acordo com o tratamento, de 11 a 16 dias. Segundo Kranz (2002a), para uma doença policíclica, a duração do período de latência determina o número de gerações do patógeno no ciclo de cultivo do hospedeiro, isto é, quantos ciclos secundários ocorrerão. Ainda segundo esse autor, quanto mais ciclos

secundários o patógeno completar em um ciclo do hospedeiro, maior a quantidade de inóculo produzida e maior a intensidade da doença. Portanto, quanto maior a temperatura (de 20 a 25°C) e o período de molhamento foliar (de 8 a 24 h), menor será o período de latência da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar, mais rápido será seu ciclo no ciclo de cultivo da cultura e, conseqüentemente, maior a intensidade da epidemia. Para confirmar a importância do período latente para ferrugens, pode ser citado Parlevliet (1979), que considera o período de latência em material vegetal um importante critério para seleção de resistência a ferrugens.

Outro aspecto epidemiológico notado nesse estudo foi que as lesões da ferrugem alaranjada iniciaram pequenas e esporulantes, e com o passar do tempo, aumentavam sua área. O crescimento da área das lesões é um comportamento típico de patógenos de clima tropical (BERGAMIN FILHO; AMORIM, 1996). O aumento da área da lesão é um componente importante na epidemia de uma doença policíclica, pois a severidade da doença pode aumentar sem a necessidade da formação de novas lesões (KRANZ, 2002a; BERGER; BERGAMIN FILHO; AMORIM, 1997). Os dados do presente estudo mostra que a 25°C a área das lesões foi significativamente superior que a 20°C para os períodos de molhamento foliar de 12, 18 e 24 h. A partir desse conhecimento, pode ser inferido que o plantio da cultura em condições menos favoráveis ao desenvolvimento das lesões pode ser utilizado para o manejo do patossistema ferrugem alaranjada e cana-de-açúcar.

Quanto às temperaturas avaliadas para o desenvolvimento da ferrugem alaranjada, observa-se que a doença ocorre apenas entre 20 e 25°C. Nestas temperaturas *Puccinia kuehnii* precisa de pelo menos 8 h de período de molhamento foliar para causar doença e com 12 a 24 h de molhamento a doença apresenta maior severidade. Em 0 e 4 h de período de molhamento foliar, não houve desenvolvimento da doença em nenhuma das temperaturas estudadas. Esse fato também ocorre para outras doenças fúngicas, que necessitam de água livre na superfície ou de um período mínimo de umidade para haver germinação e penetração do tubo germinativo pelo estômato do hospedeiro (KUSHALAPPA; ESKES, 1989).

O modelo monomolecular foi ajustado ao número de pústulas versus dia, que gerou as curvas de progresso da doença. O ajuste dos dados da ferrugem, uma

doença policíclica, a esse modelo, se deve ao fato de ter sido realizada apenas uma inoculação e proporcionado apenas uma vez condição de molhamento foliar, o que mostra o comportamento do monociclo da doença. Na presente situação, os sintomas foram ocasionados por contatos efetivos dos urediniósporos com a planta, uma vez que o patógeno não pôde realizar ciclos secundários no hospedeiro.

O modelo beta monomolecular foi ajustado à combinação dos dados de número de pústulas, período de molhamento foliar e temperatura. Esse ajuste foi avaliado pelo coeficiente de determinação R^2 , pois com o fato de apenas duas das temperaturas avaliadas permitirem o desenvolvimento da doença, os parâmetros do modelo não puderam ser avaliados. Para o estudo desses parâmetros, dados intermediários de temperatura poderiam ser avaliados, com intervalos menores que cinco graus, o que demandaria condições mais precisas de incubação.

Em uma análise conjunta dos dados *in vitro* e *in vivo*, verifica-se que *P. kuehnii* germina *in vitro* a 10 e 15°C, mas não causa doença na planta nessas temperaturas. Dados semelhantes foram encontrados por Alves (2007), que mostrou que *Phakopsora pachyrhizi* germina em temperaturas de 8 a 30°C *in vitro*, submetida a determinados períodos de câmara úmida, mas não causa doença *in vivo* na temperatura de 30°C. No presente estudo com ferrugem alaranjada, acredita-se que o crescimento em menor tempo de incubação do tubo germinativo dos urediniósporos dos tratamentos 20 e 25°C, pode ter influenciado a fase de pré-infecção da ferrugem alaranjada e colaborado para a efetivação da infecção nessas temperaturas.

De acordo com Magarey (2000) e também por observações do presente trabalho, os sintomas da ferrugem alaranjada podem ocorrer em ambas as faces das folhas, porém as pústulas prevalecem na face abaxial. Este fato indica uma maior infecção por estômatos, que se concentram nessa superfície em cana (JAMES, 2004).

Mesmo não havendo estudos sobre o modo de infecção (direta ou indireta) por *P. kuehnii*, mas sabendo-se que a grande maioria das ferrugens penetra indiretamente (ADENDORFF; RIJKENBERG, 2000), é possível formular a hipótese de que a doença ocorre exatamente no verão, principalmente pelo fato de serem encontradas temperaturas noturnas ao redor de 20 e 25°C. Este, provavelmente, é o período do dia

em que existe maior possibilidade dos urediniósporos encontrarem maior número de estômatos abertos, o que aumenta a chance de infecção.

Outro evento importante para a ocorrência da ferrugem alaranjada durante a estação do verão nos países em que a doença foi relatada é a alta pluviosidade que pode auxiliar o seu desenvolvimento, tendo em vista que as bainhas da planta acumulam água e podem manter essa umidade por muitas horas. Segundo o pesquisador Adhair Ricci Júnior², em algumas situações, o canavial pode permanecer com água na superfície da folha por aproximadamente 20 h (informação verbal).

Na natureza, a germinação do esporo e a entrada do tubo germinativo na planta deve ocorrer rapidamente, tendo em vista que o tubo germinativo é uma estrutura sensível a condições adversas do ambiente, como a falta de umidade e temperaturas altas (AGRIOS, 2005c). Caso as condições favoráveis para a ferrugem alaranjada não ocorram frequentemente em campo, a doença não será severa, pois o patógeno não conseguirá completar ciclos de vida dentro do mesmo ciclo da cultura. Para que esse complete ciclos de vida no ciclo da cultura, as condições descritas nesse trabalho devem estar presentes, ou seja, 20 a 25°C com pelo menos 8 h de molhamento foliar.

Se as condições favoráveis, o hospedeiro suscetível e o patógeno virulento estiverem presentes, a doença se manifestará. Uma forma de controlar a manifestação da doença poderia ser por meio de variedades resistentes. Existem variedades resistentes para a maioria das doenças que ameaçam a cana-de-açúcar. No entanto, como a ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar é uma doença nova nos canaviais brasileiros, as variedades ainda estão sendo avaliadas. Parte dessa avaliação ocorreu mesmo antes da chegada da doença ao Brasil, em programas de melhoramento de outros países, porém estudos ainda estão sendo desenvolvidos nesta direção. Outro aspecto é que muitos campos ainda estão plantados com variedades suscetíveis, pois o canavial ainda não está no período de reforma, que ocorre a cada cinco cortes (MARGARIDO, 2006). Portanto, por alguns anos, variedades suscetíveis ainda estarão presentes no campo e serão evitadas a partir das reformas dos canaviais.

O controle químico é também discutido como uma forma de controle para a ferrugem alaranjada e tem sido estudado em países como Austrália (MAGAREY, 2002,

² Adhair Ricci Júnior – Centro de Tecnologia Canavieira (CTC)

STAIER; MAGAREY; WILLCOX, 2003) e EUA (RAID³, informação pessoal). No Brasil, atualmente há um fungicida recém registrado para ferrugem alaranjada, uma mistura dos grupos triazol (ciproconazol) e estrubilurina (azoxistrobina).

A doença possivelmente poderá ser controlada com químicos em duas situações: na falta de uma variedade que substitua a suscetível e na chegada da doença a um novo país, que sofrerá impossibilidades da retirada imediata das variedades suscetíveis de seus campos. No primeiro caso, países com pequenos programas de melhoramento, com poucas alternativas para substituição de variedades adaptadas a determinadas áreas, necessitarão frequentemente do método químico. No segundo caso, o controle químico será necessário até a substituição do canavial se completar, e portanto, estará com seus dias contados até uma possível mutação da população do patógeno. Segundo Magarey (2000), a existência de raças é válida para essa doença. Como apoio ao controle químico para ferrugem alaranjada, um sistema de previsão foi desenvolvido, visando informar o momento em que a cultura está no período crítico e que deve ser aplicado o fungicida (SCORALERT, 2010).

Uma terceira forma de controle para a ferrugem seria o plantio de variedades suscetíveis ou intermediariamente suscetíveis somente em áreas que não favorecem o desenvolvimento da doença. Assim, variedades suscetíveis ainda poderiam ser utilizadas e o controle químico poderia ser evitado. Visando efetivar esta terceira forma de controle, mapas de zonas de risco de epidemia de ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar foram desenvolvidos neste trabalho, para o Estado de São Paulo. Com esses mapas puderam ser encontradas as porcentagens de dias favoráveis para o desenvolvimento da doença (favorabilidade) anuais e média, para toda a extensão do Estado.

Ao serem analisados os mapas de zonas de risco de epidemias, nota-se que as áreas de maior favorabilidade para a ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo foram uma porção do litoral (Sudeste), parte da fronteira com o Paraná, o Centro Sul e o Centro Norte do Estado. Segundo mapas do LUPA (Levantamento Censitário das Unidades de Produção Agropecuária do Estado de São

³ Raid, R.N. **A synopsis of sugarcane orange rust epidemics during 2008 and 2009.** Belle Glade, 25 set. 2009. Palestra ministrada a 40th Annual Meeting: ASSCT Florida Division.

Paulo) de 2007/2008, a região Sudeste do Estado de São Paulo é pouco/não cultivada com cana-de-açúcar, assim como a fronteira Sul com o Estado do Paraná, possivelmente pela baixa/não aptidão agrícola para a cultura (BRASIL, 2009).

Por meio dos mapas do LUPA, observa-se que na região Centro Norte do Estado a cana-de-açúcar é intensivamente cultivada e, nesta área, segundo dados do presente trabalho, há média a alta favorabilidade para o desenvolvimento da ferrugem alaranjada. Esta é, possivelmente, a área de maior cautela para o cultivo de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, onde invariavelmente devem ser plantadas variedades resistentes à doença.

Na região de Pindorama, que possui alta variabilidade do risco à ferrugem alaranjada e que é intensivamente cultivada com cana-de-açúcar, devem ser evitados plantios de variedades suscetíveis à doença. Isso porque uma variedade fica pelo menos cinco anos no campo, o que a expõe a anos desfavoráveis nesta região, mas também a anos favoráveis ao desenvolvimento da doença e possível ocorrência de epidemias, gerando prejuízos.

As demais áreas cultivadas do Estado de São Paulo variam na porcentagem de dias favoráveis entre 28 e 56%. As áreas de menor favorabilidade da doença, como o Noroeste, apresentam pelo menos 28% de dias favoráveis. Isso mostra que a ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar é capaz de se desenvolver em toda a extensão do território paulista.

Os dados climáticos utilizados para o desenvolvimento dos mapas de favorabilidade foram de uma série de cinco anos. Trabalhos complementares podem ser realizados para obtenção de maior série de dados climáticos, o que possibilitaria uma maior precisão a respeito do assunto.

As informações deste trabalho corroboram para mostrar a importância da associação entre clima e doença e permitem a distinção entre zonas mais ou menos favoráveis ao desenvolvimento da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo. Essas informações permitem um melhor manejo da doença, o que vem a diminuir o risco de epidemias.

3 CONCLUSÕES

Os urediniósporos de ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar germinam na faixa de 10 a 25°C; a faixa mais favorável está entre 20 e 25°C. A 20°C ocorre maior crescimento do tubo germinativo.

Os períodos de incubação e de latência estão ao redor de 11 dias, mas são influenciados pelo período de molhamento e pela temperatura.

A condição que propicia a infecção da ferrugem alaranjada *in vivo* é o mínimo de 8 h de período de molhamento foliar e temperaturas de 20 a 25°C. A 25°C pústulas maiores são formadas e a severidade da doença é maior.

Os sintomas ocorrem predominantemente na face inferior da folha, mas também podem ocorrer na face superior.

As zonas de maior favorabilidade no Estado de São Paulo para epidemias de ferrugem alaranjada, e que são cultivadas com cana-de-açúcar, são o Centro Norte e o Centro Sul do Estado. Nestas zonas favoráveis, variedades suscetíveis não devem ser cultivadas.

REFERÊNCIAS

ADENDORFF, R.; RIJKENBERG, F.H.J. Scanning electron microscopy of direct host leaf penetration by urediospore-derived infection structures of *Phakopsora apoda*. **Mycological Research**, Cambridge, v. 104, p. 317-324, 2000.

AGRIOS, G. Environmental effects on the development of infectious plant disease. In: _____. **Plant pathology**. 5th ed. London: Elsevier, 2005a. chap. 7, p. 249-263.

_____. Plant disease epidemics. In: _____. **Plant pathology**. 5th ed. London: Elsevier, 2005b. chap. 8, p. 266-291.

_____. Parasitism and disease development. In: _____. **Plant pathology**. 5th ed. London: Elsevier, 2005c. chap. 8, p. 77-123.

ALVES, S.A.M. **Quantificação de parâmetros da pré-penetração e monocíclicos relacionados ao patossistema *Phakopsora pachyrhizi* - soja**. 2007. 64 p. Tese (Doutorado em Fitopatologia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

ARAUZ, L.F.; SUTTON, T.B. Influence of temperature and moisture on germination of ascospores and conidia of *Botryphaeria obtusa*. **Plant Pathology**, Saint Paul, v. 30, p. 553-577, 1992.

BARBASSO, D.; JORDÃO, H.; MACCHERONI, W.; BOLDINI, J.; SANGUINO, A. First report of *Puccinia kuehnii*, causal agent of orange rust of sugarcane, in Brazil. **Plant Disease**, Saint Paul, 2010. In press.

BERGAMIN FILHO, A. Curvas de progresso da doença. In: BERGAMIN FILHO, A.; KIMATI, H., AMORIM, L. **Manual de fitopatologia I**. 3. ed. Piracicaba: Ceres, 1995. cap. 30, p. 602-626.

BERGAMIN FILHO, A.; AMORIM, L. O fitopatossistema temperado. In: _____. **Doenças das plantas tropicais: epidemiologia e controle econômico**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1996. cap. 6, p. 99-126.

BERGAMIN FILHO, A.; KIMATI, H. História da fitopatologia. In: BERGAMIN FILHO, A.; KIMATI, H., AMORIM, L. **Manual de fitopatologia I**. 3. ed. Piracicaba: Ceres, 1995. cap. 1, p. 2-12.

BERGER, R.D.; BERGAMIN FILHO, A.; AMORIM, L. Lesion expansion as an epidemic component. **Phytopathology**, Saint Paul, v. 87, n. 10, p. 1005-1013, 1997.

BOURKE, P.M.A. Use of weather information in the prediction of plant disease epiphytotics. **Annual Review of Phytopathology**, Palo Alto, v. 8, p. 345-337, 1970.

BRAITHWAITE, K.S. **Assessing the impact that pathogen variation has on the sugarcane breeding program.** SRDC Final Report for Project BSS258 Publ. SD5018, Indooroopilly: Sugar Research and Development Corporation, 2005. 47p. (Relatório Final).

BRAITHWAITE, K.S.; CROFT, B.J.; MAGAREY, R.C.; SCHARASCHKIN, T. Phylogenetic placement of the sugarcane orange rust pathogen *Puccinia kuehnii* in a historical and regional context. **Australasian Plant Pathology**, Collingwood, v. 38, p. 380-388, 2009.

CAMPBELL, C.L.; MADDEN, L.V. **Introduction to plant disease epidemiology.** New York: Wiley, 1990. 532 p.

CHAVARIA, E. First report of orange rust of sugarcane caused by *Puccinia kuehnii*, in Costa Rica and Nicaragua. **Plant Disease**, Saint Paul, v. 93, n. 4, p. 425, 2009.

COAKLEY, S.M. Variation in climate and prediction of disease in plants. **Annual Review of Phytopathology**, Palo Alto, v. 26, p. 136-181, 1988.

COAKLEY, S.M.; SHERM, H.; CHAKRABORTY, S. Climate change and plant disease management. **Annual Review of Phytopathology**, Palo Alto, v. 37, p. 399-426, 1999.

COMSTOCK J.; SHINE J. Effect of rust on sugarcane growth and biomass. **Plant Disease**, Saint Paul, v. 76, p. 175-177, 1992.

COMSTOCK, J.C.; SOOD S.G.; GLYNN, N.C.; SHINE, J.M.; MCKEMY, J.M.; CASTLEBURY L. A. First report of *Puccinia kuehnii*, causal agent of orange rust of sugarcane, in the United States and Western Hemisphere. **Plant Disease**, Saint Paul, v. 92, n. 6, p. 175, 2008.

CENTRO DE TECNOLOGIA CANAVIEIRA. Disponível em: <http://www.ctcanavieira.com.br/site/index.php?option=com_content&view=article&id=507:ferrugem-alaranjada-da-cana-de-acucar-mapa-de-ocorrencias&catid=3:destaque&Itemid=1460>. Acesso em: 30 ago. 2010.

DEL PONTE, E.M.; GODOY, C.V.; LI, X., YANG, X.B. Predicting severity of asian soybean rust epidemics with empirical rainfall models. **Phytopathology**, Saint Paul, v. 96, n. 7, p. 797-803, 2006.

DE WOLF, E.D.; ISARD, S.A. Disease cycle approach to plant disease prediction. **Annual Review of Phytopathology**, Palo Alto, v. 45, p. 203-220, 2007.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/estadosat/perfil.php?sigla=sp>>. Acesso em: 23 jul. 2010.

FAO. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/site/408/default.aspx>>. Acesso em: 30 jul. 2010.

FLORES, R.C.; LOYO, J.R.; OJEDA, R.A.; RANGEL, O.C.A.; CERÓN, F.A.; MÁRQUEZ, W.; GUERRA-MORENO, A.S.; HERNANDEZ-IBARRA, H.M.; GONZÁLEZ, R.E.; CASTLEBURY, L.A.; DIXON, L.J.; GLYNN, N.C.; COMSTOCK, J.C.; FLYNN, J.; AMADOR, J. First report of orange rust of sugarcane caused by *Puccinia kuehnii*, in Mexico, El Salvador and Panama. **Plant Disease**, Saint Paul, v. 93, n. 12, p. 1347, 2009.

FNP CONSULTORIA & COMÉRCIO. Cana. In: _____. **Agrianual 2006**: anuário da agricultura brasileira. São Paulo, 2006. p. 227-248.

GIGLIOTI, E.A.; ZAVAGLIA, L.P.; MENESES, L.L.; MOURA, G.L.; MATSUOKA, S. **Resistência e tolerância à ferrugem da cana-de-açúcar**: o caso da RB835486. Araras: CCA/UFSCar, 1999. 10 p. (Boletim Técnico).

GLYNN, N.C.; DIXON, L.J.; CASTLEBURY, L.A.; SZABO, L.J.; COMSTOCK, J.C. PCR assays for the sugarcane rust pathogens *Puccinia kuehnii* and *P. melanocephala* and detection of a SNP associated with geographical distribution in *P. kuehnii*. **Plant Pathology**, Saint Paul, v. 59, p. 703-711, 2010.

HAMADA, E.; GHINI, R.; LANA, J.T.; OLIVEIRA, E. Aplicação de Sistema de Informações Geográficas na análise espacial de doenças do milho no Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 3883-3889.

HAMADA, E.; GHINI, R.; ROSSI P.; PEDRO JÚNIOR, M.J.; FERNANDES, J.L. Climatic risk of grape downy mildew (*Plasmopara viticola*) for the state of Sao Paulo, brazil. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 65, p. 60-64, 2008.

HAU, B.; KRANZ, J. Mathematics and statistics for analysis in epidemiology. In: KRANZ J. (Ed). **Epidemics of plant diseases**: mathematical analysis and modeling. Berlin: Springer, 1990. p. 12–52.

HAUKSWORTH, D.L.; KIRK, P.M.; SUTTON, B.C.; PEGLER, D.N. **Ainsworth & Bisby's dictionary of the fungi**. 8th ed. Cambridge: CAB International, 1995. 616 p.

HEINZ, D.J. (Ed.). **Sugarcane improvement through breeding**. Amsterdam: Elsevier Science, 1987. 603 p.

HOFFMANN, H.P.; DIAS, E.G.; BASSINELO, A.I.; SANCHES, M.A. **Variedades RB de cana-de-açúcar**. Araras: UFSCar, CCA, 2008. 28 p.

HUBER, L.; GILLESPIE, T.J. Modeling leaf wetness in relation to plant disease epidemiology. **Annual Review of Phytopathology**, Palo Alto, v. 30, p. 553-577, 1992.

JAMES, G.L. An introduction to sugarcane. In:_____. **Sugarcane**. Oxford : Blackwell Science, 2004. chap. 1, p. 1-19.

KRANZ, J. The infection cycle or chain. In:_____. **Comparative epidemiology of plant diseases**. Berlin: Springer, 2002a. chap. 4, p. 49-92.

_____. Comparison of spatial aspects of epidemics. In:_____. **Comparative epidemiology of plant diseases**. Berlin: Springer, 2002b. chap. 6, p. 135-156.

KRAUSE, R.A.; MASSIE, L.B. Predictive systems: modern approaches to disease control. **Annual Review of Phytopathology**, Palo Alto, v. 13, p. 31-47, 1975.

KUSHALAPPA, A.C.; ESKES A.B. Advances in coffee rust research. **Annual Review of Phytopathology**, Palo Alto, v. 27, p. 503-531, 1989.

LOPES , M.V. **Mapas de zonas de risco de epidemias para doenças dos citros no Estado de São Paulo**. 2007. 46 p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal)- Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2007.

LOPES, M.V.; BARRETO, M.; SCALOPPI, E.A.G.; BARBOSA, J.C.; BRUNINI, O. Mapas de zonas de risco de epidemias e zoneamento agroclimático para o cancro cítrico no Estado de São Paulo. **Summa Phytopathologica**, Botucatu, v. 34, n. 4, p. 349-353, 2008.

LEVANTAMENTO CENSITÁRIO DAS UNIDADES DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA DO ESTADO DE SÃO PAULO. Disponível em:
<<http://www.cati.sp.gov.br/projetolupa/mapaculturas/Cana.php>>. Acesso em: 30 ago. 2010.

KOCHMAN, J.K. The effect of temperature on development of soybean rust (*Phakopsora pachyrhizi*). **Australian Journal of Agricultural Research**, Victoria, v. 30, p. 273-277, 1979.

MADDEN, L.V.; HUGHES G.; VAN DEN BOSH, F. **The study of plant disease epidemics**. Saint Paul: APS Press, 2007. 421 p.

MAGAREY, R.C. Orange rust. In: ROTT, P.; BAILEY, R.A.; COMSTOCK, J.C.; CROFT, B.J.; SAUMTALLY, A.S. (Ed). **A guide to sugarcane diseases**. Montpellier: CIRAD; ISSCT, 2000. p. 121-125.

_____. Sugarcane orange rust, threat to other countries and its impact on Australian sugar production. **Fitopatologia Brasileira**, Brasília, v. 32, p. 52-53, 2007.

MAGAREY, R.C.; NEILSEN, W.A.; BULL, J.I. The effect of orange rust on sugarcane yield in breeding selection trials in cereal Queensland:1999-2001. **Proceedings of Australian Society of Sugar Cane Technology**, Queensland, v. 26, 2004. 1 CD-ROM.

MAGAREY, R.C.; NEILSEN, W.A.; MAGNANI, A.J. Environmental requirements for spore germination in three sugarcane leaf pathogens. **Proceedings of Australian Society of Sugar Cane Technology**, Queensland, v. 26, 2004. 1 CD-ROM.
MAGAREY, R.C.; STAIER, T.; WILLCOX, T. Fungicides for control of orange rust in the 2001 Queensland crop. **Proceedings of Australian Society of Sugar Cane Technology**, Queensland, v. 24, 2002. 1 CD-ROM.

MAGAREY, R.C.; WILLCOX, T.; CROFT, B.; CORDINGLEY, A. Orange rust, a major pathogen affecting crops of Q124 in Queensland in 2000. **Proceedings of Australian Society of Sugar Cane Technology**, Queensland, v. 23, p. 274-280, 2001.

MARGARIDO, F.B. Planejamento agrícola em cana-de-açúcar. In: SEGATO, S.V.; PINTO, A.S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J.C.M. (Ed). **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP2, 2006. cap. 5, p. 69-78.

MEIRA, C.A.A.; RODRIGUES L.H.A.; MORAES, S.A. Análise da epidemia da ferrugem do cafeeiro com árvore de decisão. **Tropical Plant Pathology**, Brasília, v. 33, p. 114-124, 2008.

MANZATTO, C.V.; ASSAD, E.D.; BACCA, J.F.M.; ZARONI, M.J.; PEREIRA, S.E.M. (Org.). **Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar**. Rio de Janeiro, 2009. 55 p.

MORDUE, J.W.M. Urediniospore ornamentation in the sugarcane pathogens *Puccinia kuehnii* and *P. melanocephala*. **Transactions of the British Mycological Society**, Cambridge, v. 84, n. 4, p. 758-760, 1985.

NAGARAJAN, S.; SINGH, D.V. Long-distance dispersion of rust pathogens. **Annual Review of Phytopathology**, Palo Alto, v. 28, p. 139-153, 1990.

OVALLE, W.; COMSTOCK J.C.; GLYNN N.C.; CASTLEBURY L.A. First report of *Puccinia kuehnii*, causal agent of orange rust of sugarcane, in Guatemala. **Plant disease**, Saint Paul, v. 92, n. 6, p. 973, 2008.

PARLEVLIET, J.E. Components of resistance that reduce the rate of epidemic development. **Annual Review of Phytopathology**, Palo Alto, v. 17, p. 203-222, 1979.

PÉREZ-VICENTE, L.; MARTÍN-TRIANA, E.L.; BARROSO, F.; MARTÍNEZ-DE-LA-PARTE, E.; BORRÁS-HIDALGO, O.; ESTÉVEZ, I.H. Definitive identification of orange rust of sugarcane caused by *Puccinia kuehnii* in Cuba. **New Disease Reports**, Reading, v. 20, p. 16, 2009.

RYAN C.C., EGAN, B.T. Rust. In: RICAUD, C.; EGAN, B.T.; GILLASPIE JÚNIOR, A.G.; HUGHES, C.G. (Ed.). **Diseases of sugarcane**: major diseases. Amsterdam: Elsevier, 1989. p. 189–210.

SANTOS, E.G.D.; CHAPOLA, R.G.; GONÇALVES, R.A.; MOUTA, E.R.; VIEIRA, M.A.S.; BASSINELLO, A.I.; HOFFMANN, H.P. Censo varietal 2007 de áreas canavieiras da região centro sul. **STAB. Açúcar, Álcool & Subprodutos**, Piracicaba, v. 26, n. 4, p. 42-46, 2008.

SENTELHAS, P.C.; FARIA, T.R.; CHAVES, M.O.; HOOGENBOMM, G. Evaluation of WGEN and SIMMETEO weather generations for the Brazilian tropics and subtropic, using crop simulation models. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, p. 357-376, 2001

SHAW, M. The physiology and host-parasite relations of the rusts. **Annual Review of Phytopathology**, Palo Alto, v.1, p. 259-294, 1963.

SOOD, S.G.; COMSTOCK, J.C.; GLYNN, N.C. Leaf whorl inoculation method for screening sugarcane rust resistance. **Plant Disease**, Saint Paul, v. 93, n. 12, p. 1335, 2009.

SCORALERT. Disponível em: < <http://scoralert.com> >. Acesso em: 30 ago. 2010.

STAIER, T.N.; MAGAREY, R.C.; FINLAYSON, W.A. Meteorological data collection, analysis and sugarcane disease forecasting for orange rust. **Proceedings of Australian Society of Sugar Cane Technology**, Queensland, v. 26, 2004. 1 CD-ROM.

STAIER, T.N.; MAGAREY, R.C.; WILLCOX, T.G. Control of orange rust in sugarcane with fungicides. **Proceedings of Australian Society of Sugar Cane Technology**, Queensland, v. 25, 2003. 1 CD-ROM.

TENG, P.S., YANG, X.B. Biological impact and risk assessment in plant pathology. **Annual Review of Phytopathology**, Palo Alto, v.31, p. 495-521, 1993.

TOKESHI, H.; RAGO, A. Doenças da cana-de-açúcar. In: KIMATI, H.; AMORIM, L.; REZENDE, J.A.M.; BERGAMIN FILHO, A.; CAMARGO, L.E.A. (Ed.). **Manual de fitopatologia**. 4. ed. São Paulo: Agronômica Ceres, 2005. p. 185-196. 2v.

TOMERLIN, J.R.; EVERSMEYER, M.G.; KRAMER, C.L.; BROWDER L.E. Temperature and host effects on latent and infectious period and on urediniospore production of *Puccinia recondita* f. sp. *tritici*. **Phytopathology**, Saint Paul, v. 73, n. 3, p. 414-419, 1983.

VIRTUDAZO, E.V.; NAKAMURA, H.; KAKISHIMA, M. Ribosomal DNA-ITS sequence polymorphism in the sugarcane rust, *Puccinia kuehnii*. **Mycoscience**, Tokyo, v. 42, p. 447-453, 2001a.

_____. Phylogenetic analysis of sugarcane rusts based on sequences of ITS, 5.8 S rDNA and D1/D2 regions of LSU rDNA . **Journal of General Plant Pathology**, Tokyo, v.67, p. 28-36, 2001b.

VIRTUDAZO, E.V.; NOJIMA, H.; KAKISHIMA, M. Taxonomy of *Puccinia* species causing rust diseases on sugarcane. **Mycoscience**, Tokyo, v. 42, p. 167-175, 2001.

WELTZIEN, H.C. Geophytopathology. **Annual Review of Phytopathology**, Palo Alto, v.10, p. 277-298, 1972.

YOUNG, H.C.; PRESCOTT, J.M.; SAARI, E.E. Role of disease monitoring in preventing epidemics. **Annual Review of Phytopathology**, Palo Alto, v.16, p. 263-285, 1978.