

การใช้ข้อมูล RADARSAT-1 SAR (standard mode) เพื่อทำแผนที่ แสดงพื้นที่ปลูกข้าวในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

Use of RADARSAT-1 SAR data (standard mode) to map cultivated areas of rice crop in the northeast region

เริงศักดิ์ กตเวทิน^{1*} และ ปาณัท จีมไรสง²

Roengsak Katawatin^{1*} and Panath Jermthaisong²

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้ดำเนินการเพื่อศึกษาผลของการใช้ข้อมูลเรดาร์จากดาวเทียม RADARSAT-1 SAR (standard mode) ในการทำแผนที่แสดงพื้นที่ปลูกข้าวนาปีในภาคตะวันออกเฉียงเหนือเป็นรายปี ข้อมูลเรดาร์ที่ใช้ประกอบด้วย ชุดข้อมูลบันทึกเมื่อวันที่ 4 กรกฎาคม 14 กันยายน และ 25 ตุลาคม 2549 รวม 3 ชุด ซึ่งข้อมูลเหล่านี้ถูกวิเคราะห์ด้วยวิธี Maximum Likelihood โดยใช้แบบแผนการจำแนก 2 แบบ แบบแผนการจำแนกที่ 1 ประกอบด้วยชั้นจำแนก (class) 4 ชั้น พื้นที่ปลูกข้าวถูกแยกเป็น 2 ชั้นจำแนก ตามรูปแบบการปลูกข้าว 2 รูปแบบหลักที่พบในพื้นที่ศึกษา คือ (1) ข้าวปลูกประมาณเดือนมิถุนายน เก็บเกี่ยวหลังสัปดาห์สุดท้ายของเดือนตุลาคม และ (2) ข้าวปลูกประมาณเดือนมิถุนายน เก็บเกี่ยวก่อนสัปดาห์สุดท้ายของเดือนตุลาคม นอกจากนี้ คือ ชั้นจำแนกของพืชไร่ และชั้นจำแนกของป่าไม้ การทำแผนที่แสดงพื้นที่ปลูกข้าวจากการใช้แบบแผนการจำแนกนี้ มีความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ปานกลางสำหรับการปลูกข้าวในรูปแบบที่ 1 (ค่า Producer's Accuracy = 75.00 % และ User's Accuracy = 78.95 %) แต่สำหรับการปลูกข้าวในรูปแบบที่ 2 ความถูกต้องของการทำแผนที่ค่อนข้างต่ำ (ค่า Producer's Accuracy = 54.55 % และ User's Accuracy = 60.00 %) แบบแผนการจำแนกที่ 2 ประกอบด้วย 3 ชั้นจำแนก ใช้ในกรณีที่ต้องการทำแผนที่แสดงพื้นที่ปลูกข้าวทั้งหมดโดยไม่มีการแยกข้าวที่ปลูกในรูปแบบต่างๆ ดังนั้นจึงรวมการปลูกข้าวทั้ง 2 รูปแบบเข้าด้วยกันเป็นชั้นจำแนกเดียว โดยที่ชั้นจำแนกอื่นๆ ยังคงเดิม การทำแผนที่แสดงพื้นที่ปลูกข้าวตามแบบแผนการจำแนกนี้มีความถูกต้องดีขึ้นเล็กน้อย (ค่า Producer's Accuracy = 74.19 % และ User's Accuracy = 82.14 %) กล่าวโดยสรุป เทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูลเรดาร์ที่ใช้ในการศึกษานี้ ให้ผลซึ่งมีความถูกต้องในระดับปานกลาง สามารถใช้ประโยชน์ในการทำแผนที่แสดงพื้นที่นาข้าวโดยรวมได้ แต่ในกรณีที่ต้องการแยกพื้นที่ปลูกข้าวรูปแบบต่างๆ ออกจากกันยังมีข้อจำกัดอยู่

คำสำคัญ: ข้าว, ข้อมูลเรดาร์แซท, ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

ABSTRACT: This research was conducted to investigate performance of using RADARSAT-1 SAR (standard mode) to map areas of the in-season rice cropping in the northeast region, in each particular year. Three sets of the radar data acquired on different dates, i.e., 4th July, 14th September, and 25th October 2006, were used. The Maximum Likelihood classifier was applied to classify these data based on 2 classification schemes. The scheme #1 included 4 classes. Rice cropping areas were divided into 2 classes (Classes 1 and 2) representing 2 major cropping patterns. Class 1 was the areas of rice crop grown around June and harvested after last week of October. Class 2 was the areas of rice crop grown around June and harvested before last week of October. Other classes were field crops and forest.

¹ ภาควิชาพืชศาสตร์และทรัพยากรการเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

Department of Plant Science and Agricultural Resources, Faculty of Agriculture, Khon Kaen University

² กลุ่มวิชาการเพื่อการพัฒนาที่ดิน สำนักงานพัฒนาที่ดินเขต 5 กรมพัฒนาที่ดิน

Technical Subdivision, Land Development Regional Office 5, Land Development Department

* Corresponding author: roekat@kku.ac.th

The mapping result was moderately accurate for the rice crop in Class 1 (Producer's Accuracy = 75.00 % and User's Accuracy = 78.95 %). However, for the rice crop in Class 2, the accuracy was somewhat poor (Producer's Accuracy = 54.55 % and User's Accuracy = 60.00 %). The classification scheme # 2 consisted of 3 classes. This scheme was designed for use when distinguishing the rice cropping patterns was not concerned. The rice crop of both cropping patterns were, therefore, merged into 1 class (Class 1+2). Others classes were still remained. Mapping accuracy was improved slightly for the rice cultivated areas. (Producer's Accuracy = 74.19 % and User's Accuracy = 82.14 %). In conclusion, the RADAR remote sensing technique used in this study yielded moderately accurate results. The technique can be applied to map the rice cultivated areas when all patterns of the rice cropping were considered as one class. However, distinguishing different rice cropping patterns was limiting.

Keywords: rice, RADARSAT data, northeast region

บทนำ

ในการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมของประเทศไทย การวางแผนจัดการด้านการผลิตและการตลาดสำหรับข้าวเป็นสิ่งจำเป็น เพราะว่าพืชชนิดนี้เป็นพืชหลักทั้งเพื่อการยังชีพและการส่งออกของประเทศ เนื่องจากพื้นที่ปลูกข้าวแต่ละปีไม่แน่นอน แปรปรวนไปตามสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันไป ดังนั้นทุกๆ ปีจะต้องมีการประเมินพื้นที่ปลูกข้าวและผลผลิต เพื่อให้ได้ข้อมูลสำหรับใช้เป็นหลักในการกำหนดแผนงานที่เกี่ยวข้องต่อไป

การเก็บข้อมูลพื้นที่ปลูกและผลผลิตข้าวจากการสำรวจภาคสนาม ต้องใช้เวลาและสิ้นเปลืองงบประมาณสูง ดังนั้นจึงมีการนำเอาเทคโนโลยีการรับรู้จากระยะไกลมาช่วยในการสำรวจ โดยเฉพาะเทคโนโลยีเกี่ยวกับการใช้ข้อมูลภาพเรดาร์ ซึ่งมีคุณสมบัติพิเศษคือสามารถบันทึกได้ในเกือบทุกสภาพอากาศ และใช้แยกดิน น้ำ และพืชพรรณออกจากกันได้ดี (Lillesand and Kiefer, 2004) จัดว่ามีความเหมาะสมสำหรับการทำแผนที่แสดงขอบเขตของพื้นที่ปลูกข้าวมาปีได้เป็นอย่างดี แผนที่ดังกล่าวนี้เป็นข้อมูลหลักสำหรับการประเมินพื้นที่ปลูกข้าวของแต่ละปีต่อไป

การศึกษาด้านการรับรู้จากระยะไกลด้วยเรดาร์ในภูมิภาคต่างๆ ในหลายปีที่ผ่านมา บ่งชี้ว่าข้อมูลเรดาร์มีศักยภาพสูงสำหรับการทำแผนที่แสดงพื้นที่ปลูกข้าวแต่ละปี เมื่อมีการใช้อย่างเหมาะสม (Oza et al. 2008; Bouvet and Le Toan, 2011) จากการตรวจสอบเอกสารพบว่า การใช้ข้อมูลชนิดนี้เพื่อวัตถุประสงค์ดังกล่าวอาจจะให้ผลที่มีความถูกต้องแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่

กับปัจจัยหลายประการ เช่น จำนวนชุดของข้อมูลที่ใช้ ความละเอียดเชิงพื้นที่ (spatial resolution) ของข้อมูล เวลาของการบันทึกข้อมูลแต่ละชุด และวิธีการวิเคราะห์ข้อมูล ฯลฯ (Liew et al., 1998; Chakraborty and Paningrahy, 2000; Kaojaroen, 2000; Guo, 2001; Shao et al. 2001; Li and Yeh, 2004; Oza et al. 2008) ซึ่งผู้ใช้จะต้องเลือกใช้ให้ถูกต้องกับสภาพแวดล้อมในแต่ละพื้นที่ และความละเอียดของการจำแนกที่ต้องการ

นอกจากนั้น ข้อมูลเรดาร์ชนิด Synthetic Aperture Radar (SAR) อาจใช้จำแนกรูปแบบการปลูกข้าวในพื้นที่ได้ หากใช้วิธีวิเคราะห์ที่เหมาะสม จำนวนชุดข้อมูลมากพอ และชุดข้อมูลเหล่านั้นบันทึกในเวลาที่เหมาะสมสอดคล้องกับระยะเวลาเจริญเติบโตหลักของข้าวชนิดต่างๆ Liew et al. (1998) ใช้ข้อมูล SAR ของดาวเทียม ERS-2 ซึ่งบันทึกในวันต่างๆ ของช่วงเดือนพฤษภาคม-ธันวาคม 1996 รวม 7 ชุด เพื่อจำแนกรูปแบบการปลูกข้าวของพื้นที่ดินดอนสามเหลี่ยมปากแม่น้ำโขงได้ถึง 8 แบบ Shao et al. (2001) ศึกษาการใช้ข้อมูล SAR จำแนกพื้นที่ปลูกข้าวในประเทศจีนพบว่า การวิเคราะห์ข้อมูล RADARSAT C-band, HH polarization ซึ่งบันทึกในช่วงเวลาต่างๆ ตลอดอายุการเจริญเติบโตของข้าว รวม 7 ชุด โดยใช้มาตรการจำแนกแบบ Neural Network ช่วยให้สามารถจำแนกรูปแบบการปลูกข้าวในพื้นที่ศึกษาได้ 4 รูปแบบ

ในประเทศไทย การใช้ข้อมูลเรดาร์เพื่อประเมินพื้นที่ปลูกข้าวยังค่อนข้างจำกัด อย่างไรก็ตามจากผลงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่า การใช้ข้อมูลเรดาร์ชนิดรายละเอียดเชิงพื้นที่สูง (fine spatial resolution) และบันทึกในหลายช่วงระยะเวลาการเจริญเติบโต

โดยทั่วไปแล้วจะสามารถทำแผนที่และประเมินพื้นที่ปลูกข้าวในปีที่บันทึกข้อมูลนั้นได้ผลเป็นที่น่าพอใจ ในภาคกลาง การวิเคราะห์ข้อมูล RADARSAT-SAR ที่บันทึกใน fine mode ของ สุรัชย์ และคณะ (2547) เพื่อคาดคะเนพื้นที่ปลูกข้าวในปีที่จังหวัดนครนายก ให้ผลอยู่ในเกณฑ์น่าพอใจ เช่นเดียวกับการศึกษาของ Lacoul et al. (1998) ซึ่งทำในพื้นที่จังหวัดปทุมธานี และอยุธยา สำหรับในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ การศึกษาของเริงศักดิ์ และ ปาณัฏฐ์ (2552) แสดงถึงศักยภาพของการใช้ข้อมูล RADARSAT-1 SAR (fine mode) ในการแยกพื้นที่ปลูกข้าวออกจากสิ่งปกคลุมที่ดิน / การใช้ที่ดินอื่นๆ อย่างไรก็ตามผลของการใช้ข้อมูลเรดาร์ซึ่งมีรายละเอียดเชิงพื้นที่ที่หยาบกว่านี้ยังไม่เป็นที่ทราบชัดเจน

งานวิจัยนี้ดำเนินการในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการใช้ข้อมูล RADARSAT-1 SAR (standard mode) ในการทำแผนที่สำหรับใช้ประเมินพื้นที่ปลูกข้าว ข้อมูลที่บันทึกใน standard mode นี้มีรายละเอียดเชิงพื้นที่ 25 เมตร หยาบกว่าข้อมูลจาก fine mode (รายละเอียดเชิงพื้นที่ 8 เมตร) ซึ่งการศึกษาก่อนหน้านี้พบว่าให้ผลเป็นที่น่าพอใจ แต่ข้อมูลจาก standard mode แต่ละภาพครอบคลุมพื้นที่มากกว่าประมาณ 4 เท่า (สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ, 2547) ดังนั้นหากใช้ข้อมูลที่บันทึกใน mode นี้ประเมินพื้นที่นาข้าวแล้วให้ผลในระดับที่

ยอมรับได้ จะช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายได้มากพอสมควร ในกรณีที่พื้นที่ศึกษามีขนาดใหญ่

วิธีการศึกษา

พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาเป็นตัวแทนที่ดีของภาคตะวันออกเฉียงเหนือในด้านสภาพพื้นที่และการใช้ที่ดิน ตั้งอยู่บริเวณพิกัดภูมิศาสตร์ที่ 256000 ถึง 283000 E และ 1799000 ถึง 1815000 N ของ UTM Zone 48 ซึ่งครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 200,000 ไร่ (Figure 1) พื้นที่ดังกล่าวส่วนใหญ่อยู่ในเขตตำบลท่าพระ อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น และมีบางส่วนเพียงเล็กน้อยอยู่ในเขตตำบลโพนงาม และตำบลเขาวัว อำเภอโกสุมพิสัย จังหวัดมหาสารคาม

จากการศึกษารูปถ่ายทางอากาศมาตราส่วน 1:15,000 บันทึกเมื่อปี 2543 ร่วมกับแผนที่ภูมิประเทศของกรมแผนที่ทหาร ชุด L7018 มาตราส่วน 1:50,000 และการสำรวจภาคสนาม พบว่า สภาพพื้นที่ศึกษาโดยทั่วไปเป็นลูกคลื่นลอนลาด (undulating) ซึ่งมีที่ลุ่มระหว่างเนิน สลับกับที่ราบลุ่มริมแม่น้ำชี สำหรับสิ่งปกคลุมที่ดิน / การใช้ที่ดินในบริเวณพื้นที่ศึกษามีลักษณะเช่นเดียวกับที่พบทั่วไปในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ กล่าวคือ ประกอบไปด้วยนาข้าวในรูปแบบต่างๆ ได้แก่ นาห่ม นาดอน และนาระหว่างเนิน นอกจากนี้ยังมีการใช้ที่ดินประเภทอื่นๆ ที่สำคัญได้แก่ พืชไร่ ไม้ผล ป่า แหล่งน้ำ และชุมชน เป็นต้น



Figure 1 Location of the study area (■) in Khon Kaen and Mahasarakham Provinces.

ข้อมูล RADARSAT-1 SAR

ใช้ข้อมูล RADARSAT-1 SAR (standard mode) ซึ่งมีรายละเอียดเชิงพื้นที่ 25 เมตร จำนวน 3 ชุด คือ (1) บันทึกเมื่อต้นเดือนกรกฎาคม ซึ่งข้าวส่วนใหญ่อยู่ในระยะเริ่มต้นของการเจริญเติบโตทางลำต้นและใบ (2) บันทึกกลางเดือนกันยายนซึ่งข้าวอยู่ในระยะสีบพันธุ์ และ (3) บันทึกปลายเดือนตุลาคมซึ่งข้าวส่วนใหญ่อยู่ในระยะสุกแก่และมีบางส่วนถูกเก็บเกี่ยวไปแล้ว (Table 1) ข้อมูลทั้ง 3 ชุดนี้ ถูกปรับ (calibrate) เพื่อเปลี่ยนค่าตัวเลข (digital number) ให้เป็นค่าการสะท้อนกลับของสัญญาณเรดาร์ (backscatter) และปรับแก้ความคลาดเคลื่อนทางภูมิศาสตร์ (geometric correction) โดยอ้างอิงกับแผนที่ภูมิประเทศของกรมแผนที่ทหาร ชุด 7018 มาตราส่วน 1: 50,000 แล้ว resampling ให้มีขนาด pixel 25 เมตร จากนั้นทำการกรองข้อมูลเพื่อลดปัญหา speckle (speckle filtering) โดยใช้ Lee filter (PCI, 1994)

แบบแผนการจำแนก (classification scheme)

จากผลจากการสำรวจพื้นที่ปลูกข้าว และสิ่งปกคลุมที่ดิน / การใช้ที่ดินอื่นๆ ภาคสนาม สามารถกำหนดแบบแผนการจำแนกสิ่งปกคลุมที่ดิน / การใช้ที่ดินในพื้นที่ศึกษาได้ 2 แบบ (Table 2) แบบแผนการจำแนกแบบที่ 1 ประกอบด้วยชั้นจำแนก (class) 4 ชั้น โดยแยกพื้นที่ปลูกข้าวเป็น 2 ชั้นจำแนก ตามรูปแบบการปลูกข้าว 2 รูปแบบหลักที่พบในพื้นที่ศึกษา คือ (1) ปลูกข้าวประมาณเดือนมิถุนายน เก็บเกี่ยวหลังสัปดาห์สุดท้ายของเดือนตุลาคม และ (2) ปลูกข้าว

ประมาณเดือนมิถุนายน เก็บเกี่ยวก่อนสัปดาห์สุดท้ายของเดือนตุลาคม ทั้ง 2 รูปแบบมีวันเก็บเกี่ยวแตกต่างกัน สาเหตุหลักอาจเนื่องจากความแตกต่างของพันธุ์ข้าวที่ปลูก กล่าวคือ รูปแบบที่ 1 เป็นพันธุ์ไวแสงกำหนดการเก็บเกี่ยวขึ้นกับช่วงแสง หรือเป็นพันธุ์อายุปานกลางถึงอายุยาว ส่วนรูปแบบที่ 2 เป็นพันธุ์ไม่ไวแสง หรือเป็นพันธุ์อายุสั้น นอกจากนี้ คือ ชั้นจำแนกของพืชไร่ (ซึ่งมีไม้ผลและพื้นที่เกษตรอื่นๆ ปะปนเล็กน้อย) และชั้นจำแนกของป่าไม้ แบบแผนการจำแนกนี้ใช้เมื่อต้องการทำแผนที่และแยกรูปแบบของการปลูกข้าวแบบต่างๆ ซึ่งหากทำได้ด้วยความถูกต้องสูงพอสมควร อาจจะนำไปสู่ความสามารถในการจำแนกรายละเอียดของการปลูกข้าว เช่น พันธุ์ และวิธีการปลูก ฯลฯ ได้ในอนาคต

ส่วนแบบแผนการจำแนกแบบที่ 2 ประกอบด้วย 3 ชั้นจำแนก ใช้ในกรณีที่ต้องการทำแผนที่แสดงพื้นที่ปลูกข้าวทั้งหมดโดยไม่มีการแยกข้าวที่ปลูกในรูปแบบต่างๆ ดังนั้นจึงรวมการปลูกข้าวทั้ง 2 รูปแบบเข้าด้วยกันเป็นชั้นจำแนกเดียว โดยที่ชั้นจำแนกอื่นๆ ยังคงเดิม อนึ่ง ในการศึกษาเน้นการประเมินพื้นที่ปลูกข้าว โดยวิเคราะห์ข้อมูลเรดาร์ด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อแยกพื้นที่ปลูกข้าวออกจากพื้นที่เกษตรอื่นๆ และป่าไม้ ดังนั้นจึงไม่พิจารณา แหล่งน้ำ ทางน้ำ ชุมชน และถนน ซึ่งข้อมูลสิ่งปกคลุมที่ดิน/การใช้ที่ดินทั้งสี่ประเภทหลังนี้สามารถนำมาจากแหล่งอื่น เช่น ข้อมูลเวกเตอร์ของกรมแผนที่ทหาร และเพิ่มลงในแผนที่จากการวิเคราะห์ข้อมูลเรดาร์ด้วยคอมพิวเตอร์ได้ภายหลังหากต้องการ

Table 1 Dates of data acquisition, number of training sites, and test sites used in the digital analysis of 3 sets of RADARSAT-1 SAR data for mapping the cultivated areas of rice crop.

Dates of acquisition	# training sites ^{1/}			# test sites ^{2/}		
	rice	field crop	forest	rice	field crop	forest
4 July, 2006	25+8 ^{3/}	11	20	20+11 ^{3/}	10	20
14 September, 2006						
25 October, 2006						

^{1/} for Supervised Classification

^{2/} for mapping accuracy assessment

^{3/} number of sites observed for rice cropping pattern #1 + number of sites observed for rice cropping pattern #2

Table 2 Classification schemes used in the digital classification of RADARSAT-1 SAR data

Classification Scheme #1	Classification Scheme #2
Class 1: Rice crop grown around June and harvested after last week of October (cropping pattern 1)	Class 1+2: Rice cropping pattern 1 + rice cropping pattern 2
Class 2: Rice crop grown around June and harvested before last week of October (cropping pattern 2)	
Class 3: Field crops	Class 3: Field crops
Class 4: Forest	Class 4: Forest

การจำแนกข้อมูลภาพเรดาร์ด้วยวิธี Supervised Classification

การทำแผนที่แสดงพื้นที่ปลูกข้าว ใช้มาตรการจำแนกแบบ Maximum Likelihood ของ Supervised Classification วิเคราะห์ข้อมูล RADARSAT-1 SAR ที่บันทึกในช่วงเวลาต่างๆ รวม 3 ชุดร่วมกัน (Table 1) ตามแบบแผนการจำแนก 2 แบบข้างต้น (Table 2)

ในการวิเคราะห์ให้ใช้ข้อมูลชนิดของสิ่งปกคลุมที่ดิน / การใช้ที่ดินจากจุดเก็บตัวอย่าง (sampling sites) ต่างๆ ซึ่งได้จากการสำรวจภาคสนามส่วนหนึ่งเป็น training areas สำหรับการวิเคราะห์นี้ อีกส่วนหนึ่งถูกใช้เป็น test areas สำหรับการประเมินความถูกต้องของแผนที่ที่ได้ (Table 1) ดังรายละเอียดซึ่งอธิบายไว้ในหัวข้อถัดไป

การประเมินความถูกต้องของแผนที่ (mapping accuracy)

การประเมินความถูกต้องของแผนที่แสดงพื้นที่ปลูกข้าว ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ข้อมูล RADARSAT-1 SAR ทำโดยใช้ตาราง Error Matrix และการคำนวณค่าแสดงความถูกต้องทางสถิติ ได้แก่ ค่า Overall Accuracy, สัมประสิทธิ์ KAPPA (KHAT) และ Z-statistic, Producer's Accuracy, และ User's Accuracy จากตารางดังกล่าว

Congalton and Green (2009) อธิบายว่า Error Matrix เป็นตารางแสดงหน่วยตัวอย่าง (sample units

เช่น pixel, cluster ของ pixels, หรือ polygons ฯลฯ) ซึ่งถูกจัดเข้าในชั้นจำแนกใดชั้นจำแนกหนึ่งบนแผนที่เปรียบเทียบกับหน่วยตัวอย่างบนสภาพพื้นที่จริงของตำแหน่งทางภูมิศาสตร์เดียวกัน สำหรับค่า Overall Accuracy และ KHAT แสดงถึงความถูกต้องโดยรวมของการจำแนก ค่า Overall Accuracy เป็นค่าที่แสดงสัดส่วนโดยรวมของหน่วยตัวอย่างซึ่งถูกจำแนกอย่างถูกต้องบนแผนที่ ส่วนค่า KHAT บ่งชี้ความสอดคล้อง (agreement) ระหว่างผลการจำแนก (classified data) กับความเป็นจริงบนพื้นที่ (reference data) ในการศึกษา ค่า KHAT ถูกใช้ร่วมกับ Z-statistic เป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติของแผนที่ที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูล RADARSAT-1 SAR ตามวิธีที่อธิบายข้างต้น ว่าดีกว่าวิธีการสุ่มจัดพื้นที่บนแผนที่เข้าเป็นชั้นจำแนกต่างๆ หรือไม่

ค่า Producer's Accuracy และ User's Accuracy ใช้แสดงความถูกต้องเฉพาะของแต่ละชั้นจำแนก ค่าแรกแสดงโอกาส (probability) ที่หน่วยตัวอย่างบนพื้นที่จริงของชั้นจำแนกใดชั้นจำแนกหนึ่ง ถูกจำแนกอย่างถูกต้องบนแผนที่ ส่วน ค่าหลังเป็นค่าบ่งชี้ถึงโอกาสซึ่งหน่วยตัวอย่างของชั้นจำแนกใดชั้นจำแนกหนึ่งบนแผนที่ สอดคล้องกับสภาพพื้นที่จริง ในการศึกษา ค่าความถูกต้องต่างๆ ข้างต้น คำนวณได้จากการเปรียบเทียบ pixels ซึ่งถูกจัดเข้าชั้นจำแนกใดชั้นจำแนกหนึ่งบนแผนที่ กับ สภาพจริงที่จุดตรวจสอบในสนาม ณ ตำแหน่งเดียวกัน

ค่าทางสถิติทั้งหลายข้างต้นแต่ละค่า ไม่มีเกณฑ์กำหนดแน่นอนว่าควรเป็นเท่าใดจึงจะถือว่ายอมรับได้ โดยทั่วไปแล้วค่าเหล่านี้จะถูกใช้ประกอบการพิจารณาว่า แผนที่มีความถูกต้องดีพอหรือไม่ตามความเห็นของผู้ที่เกี่ยวข้องและวัตถุประสงค์ของการใช้ประโยชน์ อย่างไรก็ตามในกรณีของค่า KHAT นั้น Landis and Koch (1977, cited after Congalton and Green, 2009) เสนอแนะไว้กว้างๆ ว่า ค่า KHAT > 0.8 แสดงว่า ผลการจำแนก กับความเป็นจริงบนพื้นที่มีความสอดคล้องกันสูง KHAT 0.4-0.8 แสดงว่า ผลการจำแนก กับความเป็นจริงบนพื้นที่มีความสอดคล้องกันปานกลาง และ KHAT < 0.4 แสดงว่า ผลการจำแนก กับความเป็นจริงบนพื้นที่มีความสอดคล้องกันต่ำ

ผลการศึกษา

การทำแผนที่แสดงพื้นที่ปลูกข้าวตามแบบแผนการจำแนกที่ 1

Table 3 แสดงจำนวนหน่วยตัวอย่าง (pixels) ซึ่งถูกจัดเข้าในชั้นจำแนกใดชั้นจำแนกหนึ่งบนแผนที่เปรียบเทียบกับสภาพพื้นที่จริงของตำแหน่งทางภูมิศาสตร์เดียวกัน ผลการประเมินความถูกต้องในตารางนี้ แสดงว่าโดยทั่วไปแล้วแผนที่ที่มีความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ปานกลาง ความถูกต้องโดยรวมของแผนที่ซึ่งแสดงโดย Overall Accuracy มีค่า 70.49 % หมายความว่า 70.49 % ของพื้นที่ทั้งหมดบนแผนที่ถูกจำแนกอย่างถูกต้อง และ KHAT = 0.5821 หมายความว่าข้อมูลบนแผนที่มีความถูกต้องในระดับปานกลาง (moderate agreement) เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูล test areas และเมื่อวิเคราะห์ค่า Z-statistics พบว่า ผลที่ได้ดีกว่าผลการทำแผนที่โดยวิธีการสุ่มจัดพื้นที่เข้าเป็นชั้นจำแนกต่างๆ ที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

เมื่อพิจารณาความถูกต้องของแต่ละชั้นจำแนก ซึ่งในการศึกษานี้เน้นเฉพาะพื้นที่ปลูกข้าว พบว่า การทำแผนที่แสดงพื้นที่ของการปลูกข้าวในรูปแบบที่ 1 (Class 1) มีความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ปานกลาง โดยค่า Producer's Accuracy = 75.00 % ซึ่งหมายความว่า

พื้นที่จริง 75.00 % ของชั้นจำแนกนี้ ถูกจำแนกอย่างถูกต้องบนแผนที่ และค่า User's Accuracy = 78.95 % ซึ่งหมายความว่า บนแผนที่ พื้นที่ 78.95 % ของชั้นจำแนกนี้ตรงกับสภาพจริง อย่างไรก็ตาม สำหรับพื้นที่ปลูกข้าวในรูปแบบที่ 2 (Class 2) ความถูกต้องของการทำแผนที่อยู่ในเกณฑ์ค่อนข้างต่ำ มีค่า Producer's Accuracy = 54.55 % ซึ่งหมายความว่า พื้นที่จริง 54.55 % ของชั้นจำแนกนี้ ถูกจำแนกอย่างถูกต้องบนแผนที่ และ User's Accuracy = 60.00 % ซึ่งหมายความว่า บนแผนที่ พื้นที่ 60.00 % ของชั้นจำแนกนี้ ตรงกับสภาพจริง การแปลความหมายของค่าทางสถิติต่างๆ ข้างต้นที่ได้กล่าวถึงในอันดับต่อไป จะเป็นในลักษณะเดียวกับที่อธิบายไว้

เมื่อพิจารณาผลการทำแผนที่สำหรับชั้นจำแนกอื่นๆ พบว่า ในกรณีชั้นจำแนกของพืชไร่ (Class 3) ได้ผลอยู่ในเกณฑ์ค่อนข้างต่ำ ค่า Producer's Accuracy = 70.00 % และ User's Accuracy = 53.85 % ส่วนชั้นจำแนกของป่าไม้ (Class 4) ผลที่ได้อยู่ในเกณฑ์ปานกลาง ค่า Producer's Accuracy = 75.00 % และ User's Accuracy = 71.43 % นอกจากนั้น Table 3 ยังบ่งชี้ว่าการจำแนกพื้นที่ปลูกข้าวรูปแบบที่ 2 (Class 2) กับ พื้นที่ของพืชไร่ (Class 3) มีความสับสนกันสูง

การทำแผนที่แสดงพื้นที่ปลูกข้าวตามแบบแผนการจำแนกที่ 2

Table 4 แสดงจำนวนหน่วยตัวอย่าง (pixels) ซึ่งถูกจัดเข้าในชั้นจำแนกใดชั้นจำแนกหนึ่งบนแผนที่เปรียบเทียบกับสภาพพื้นที่จริงของตำแหน่งทางภูมิศาสตร์เดียวกัน ผลการประเมินความถูกต้องในตารางนี้แสดงว่าโดยทั่วไปแล้วแผนที่ที่มีความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ปานกลางเช่นเดียวกับแผนที่ตามแบบแผนการจำแนกแบบที่ 1 ความถูกต้องโดยรวมของแผนที่ซึ่งแสดงโดย Overall Accuracy มีค่า 72.13 % และ KHAT = 0.6174 นอกจากนี้ เมื่อวิเคราะห์ค่า Z-statistics พบว่า ผลที่ได้ดีกว่าผลการทำแผนที่โดยวิธีการสุ่มจัดพื้นที่เข้าเป็นชั้นจำแนกต่างๆ ที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

Table 3 Performance of the digital classification based on the classification scheme #1.

Test site ^{1/}	Classified map ^{1/}				Total	Producer's Accuracy (%)
	Class 1	Class 2	Class 3	Class 4		
Class 1	15	1	2	2	20	75.00
Class 2	1	6	3	1	11	54.55
Class 3	1	1	7	1	10	70.00
Class 4	2	2	1	15	20	75.00
Total	19	10	13	19	61	
User's Accuracy (%)	78.95	60.00	53.85	71.43		
Overall Accuracy = 70.49 % KHAT = 0.5821 Z = 7.604**						

^{1/} See Table 2 for explanation of each class

** Significant at the 99% confidence level

Table 4 Performance of the digital classification based on the classification scheme #2.

Test site ^{1/}	Classified map ^{1/}			Total	Producer's Accuracy (%)
	Class 1+2	Class 3	Class 4		
Class 1+2	23	5	3	31	74.19
Class 3	0	8	2	10	80.00
Class 4	5	2	13	20	65.00
Total	28	15	18	61	
User's Accuracy (%)	82.14	53.33	72.22		
Overall Accuracy = 72.13 % KHAT = 0.6174 Z = 6.177**					

^{1/} See Table 2 for explanation of each class

** Significant at the 99% confidence level

สำหรับความถูกต้องของแต่ละชั้นจำแนก พบว่า การทำแผนที่แสดงพื้นที่ของการปลูกข้าวทุกรูปแบบ ร่วมกัน (Class 1+2) มีความถูกต้องดีขึ้นเล็กน้อย (ค่า Producer's Accuracies = 74.19 % และ User's Accuracies = 82.14 %) สำหรับการจำแนกพื้นที่ ของชั้นจำแนกอื่นๆ ได้ผลใกล้เคียงกับการจำแนกตาม แบบแผนที่ 1 กล่าวคือ ในกรณีนี้ชั้นจำแนกของพืชไร่

(Class 3) ค่า Producer's Accuracy = 80.00 % และ User's Accuracy = 53.33 % ส่วนชั้นจำแนกของ ป่าไม้ (Class 4) ค่า Producer's Accuracy = 65.00 % และ User's Accuracy = 72.22 % นอกจากนั้น **Table 4** ยังบ่งชี้ว่าความผิดพลาดทั้งหลายของการ จำแนกเมื่อใช้แบบแผนการจำแนกที่ 2 เกิดจาก ความสับสนระหว่างชั้นจำแนกทั้งสาม

สรุปและวิจารณ์

งานวิจัยนี้ดำเนินการเพื่อศึกษาผลของการใช้ข้อมูลจากดาวเทียม RADARSAT-1 SAR (standard mode) 3 ชุด บันทึกเมื่อต้นเดือนกรกฎาคม กลางเดือนกันยายน และ ปลายเดือนตุลาคม 2549 เพื่อทำแผนที่แสดงพื้นที่ปลูกข้าว ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยใช้แบบแผนการจำแนก 2 แบบ แบบแผนการจำแนกที่ 1 ประกอบด้วย 4 ชั้นจำแนก โดยแยกพื้นที่ปลูกข้าวเป็น 2 ชั้นจำแนก ตามรูปแบบการปลูกข้าว 2 รูปแบบที่พบ นอกจากนี้คือชั้นจำแนก ของป่าไม้ และชุมชน แบบแผนการจำแนกที่ 2 ใช้ในกรณีที่ต้องการเพียงแยกพื้นที่ปลูกข้าวทั้งหมดออกจากพื้นที่อื่นๆ ดังนั้นจึงรวมการปลูกข้าว 2 รูปแบบเข้าด้วยกันเป็นชั้นจำแนกเดียว (Class 1+2) โดยที่ชั้นจำแนกอื่นๆ ยังคงเดิม

ในกรณีของการใช้แบบแผนการจำแนกที่ 1 ผลการวิเคราะห์ความถูกต้องของแผนที่แสดงให้เห็นว่า เทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูลภาพเรดาร์ร่วมกัน 3 ชุด ที่ใช้ในการศึกษานี้ สามารถทำแผนที่แสดงพื้นที่ปลูกข้าวในรูปแบบที่ 1 (ข้าวปลูกประมาณเดือนมิถุนายน เก็บเกี่ยวหลังสัปดาห์สุดท้ายของเดือนตุลาคม) ได้ผลซึ่งมีความถูกต้องปานกลางโดยมี Producer's Accuracy = 75.00% และ User's Accuracy = 78.95% แต่สำหรับพื้นที่ปลูกข้าวแบบที่ 2 (ข้าวปลูกประมาณเดือนมิถุนายน เก็บเกี่ยวก่อนสัปดาห์สุดท้ายของเดือนตุลาคม) ความถูกต้องจะค่อนข้างต่ำโดยค่า Producer's Accuracy = 54.55 % และ User's Accuracy = 60.00% ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากการศึกษานี้ใช้ข้อมูล 3 ชุด (Table 1) ซึ่งข้อมูลชุดที่สามบันทึกภายหลังจากข้าวซึ่งปลูกในรูปแบบที่ 2 ถูกเก็บเกี่ยวไปแล้ว ความแตกต่างของค่าสัญญาณสะท้อนกลับระหว่างพื้นที่บริเวณนี้กับพื้นที่ของชั้นจำแนกอื่นๆ จึงมีน้อยลง ทำให้เกิดความสับสนของการจำแนกได้ง่ายขึ้น อีกประการหนึ่งจากผลการศึกษาที่ผ่านมา โดยทั่วไปแล้วการใช้ข้อมูลเรดาร์ทำแผนที่แยกพื้นที่ปลูกข้าวรูปแบบต่างๆ ต้องใช้ข้อมูล

มากกว่านี้จึงจะได้ผลเป็นที่น่าพอใจ เช่น การศึกษาของ Liew et al. (1998) และ Shao et al. (2001) ใช้ข้อมูลเรดาร์รวม 7 ชุด จำแนกรูปแบบการปลูกข้าวในพื้นที่ดินดอนสามเหลี่ยมปากแม่น้ำโขง และในประเทศจีนตามลำดับ

สำหรับการทำแผนที่ตามแบบแผนการจำแนกที่ 2 ได้ความถูกต้องของการจำแนกพื้นที่นาข้าวดีขึ้นเล็กน้อย โดย Producer's Accuracy = 74.19 % และ User's Accuracy = 82.14 % แต่ต้องแลกด้วยการสูญเสียรายละเอียดของรูปแบบการปลูกข้าวไป

นอกจากนี้ผลการศึกษายังบ่งชี้ว่า มีความสับสนในการจำแนกระหว่างพื้นที่ปลูกพืชไร่ กับพื้นที่ปลูกข้าว โดยเฉพาะการจำแนกพื้นที่ซึ่งในความเป็นจริงคือพื้นที่ปลูกข้าวไปเป็นพื้นที่ปลูกพืชไร่ ทำให้ชั้นจำแนกของพืชไร่มีค่า User's Accuracy ต่ำลงอย่างชัดเจน ทั้งในกรณีเมื่อใช้แบบแผนการจำแนกที่ 1 และ ที่ 2

ผลที่ได้จากการศึกษานี้เมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาของ เรืองศักดิ์และปณัฑ์ (2552) ในพื้นที่เดียวกัน แต่ใช้ข้อมูล RADARSAT-1 SAR ที่บันทึกใน fine mode ซึ่งมีรายละเอียดเชิงพื้นที่ดีกว่า (คือ 8 เมตร) พบว่า การทำแผนที่แสดงพื้นที่นาข้าวจากข้อมูล fine mode ให้ผลถูกต้องกว่าอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตาม ผลของการใช้ข้อมูลจาก standard mode ยังจัดว่าน่าพอใจ เนื่องจากข้อมูลที่บันทึกใน mode นี้ มีขนาดภาพครอบคลุมพื้นที่มากกว่าข้อมูลจาก fine mode ถึง 4 เท่า จึงประหยัดทั้งค่าใช้จ่ายและเวลา โดยเฉพาะในกรณีที่ใช้กับพื้นที่ขนาดใหญ่

การวิเคราะห์ข้อมูลเรดาร์ตามแบบแผนการจำแนกที่ 2 ของการศึกษานี้ อาจสามารถปรับปรุงให้ได้ผลที่ถูกต้องดียิ่งขึ้นไปอีกในอนาคต โดยการเพิ่มจำนวนชุดข้อมูล หรือ การเลือกใช้ชุดข้อมูลซึ่งบันทึกในวันที่เหมาะสมกว่านี้ การศึกษาของ Kaojarem (2000) แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มจำนวนชุดข้อมูลที่ใช้จาก 4 ชุด เป็น 5 และ 6 ชุด ช่วยให้การลากขอบเขตพื้นที่ปลูกข้าวมีความถูกต้องเพิ่มขึ้นตามลำดับ นอกจากนี้จากการศึกษาของ เรืองศักดิ์และปณัฑ์ (2552) ซึ่งใช้ Feature Selection Algorithm เลือกกลุ่มชุดข้อมูลที่ดีที่สุด

3 ชุด สำหรับทำแผนที่แสดงพื้นที่ปลูกข้าวในพื้นที่ศึกษาเดียวกันกับการศึกษานี้ พบว่า กลุ่มชุดข้อมูลที่เหมาะสม ประกอบด้วย (1) ชุดข้อมูลที่บันทึกในช่วงระยะเริ่มต้นของการเจริญเติบโตทางลำต้นและใบ (2) ชุดข้อมูลที่บันทึกในช่วงท้ายของการเจริญเติบโตทางลำต้นและใบ และ (3) ชุดข้อมูลที่บันทึกในช่วงระยะสืบพันธุ์ ซึ่งต่างจากกลุ่มชุดข้อมูลที่ใช้ในการศึกษานี้ (Table 1) ทั้งนี้เนื่องจากมีปัญหาในการรับสัญญาณจากดาวเทียม RADARSAT-1 SAR ในเดือนสิงหาคม 2549 ทำให้ไม่สามารถนำข้อมูลในเดือนดังกล่าวซึ่งข้าวอยู่ในช่วงท้ายของการเจริญเติบโตทางลำต้นและใบ มาใช้ในการวิเคราะห์

แผนที่ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลเรดาร์นี้ เมื่อนำไปใช้ในการประเมินพื้นที่ปลูกข้าวรายปี จะต้องทำด้วยความระมัดระวัง จากการตรวจเอกสารงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า มีงานวิจัยเกี่ยวกับการทำแผนที่สิ่งปกคลุมที่ดิน / การใช้ที่ดินหลายเรื่องซึ่งไม่ได้พิจารณาผนวก ถนน และลำน้ำ ในแบบแผนการจำแนก สำหรับพื้นที่ศึกษาซึ่งมีถนนและลำน้ำปรากฏอย่างชัดเจนนี้อาจเป็นสาเหตุให้การคำนวณพื้นที่ของสิ่งปกคลุมที่ดิน / การใช้ที่ดินแต่ละชั้นจำแนกบนแผนที่ ได้ค่าที่สูงกว่าความเป็นจริง เริงศักดิ์และคณะ (2551) แนะนำเทคนิคการผนวกข้อมูล ถนน และ ลำน้ำ เข้าในแผนที่ที่สร้างขึ้นโดยการวิเคราะห์ข้อมูลจากการรับรู้จากระยะไกล พร้อมทั้งเสนอผลจากการศึกษาในทุกๆ ฤดูกาลให้ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าหากไม่พิจารณาพื้นที่ถนนและลำน้ำแล้ว การคำนวณพื้นที่นาข้าวจะสูงกว่าความเป็นจริงถึงมากกว่า 7%

การทำแผนที่แสดงพื้นที่ปลูกข้าวและรูปแบบการปลูกข้าวรายปี เป็นสิ่งสำคัญ สำหรับใช้เป็นแนวทางในการคาดคะเนพื้นที่ปลูกและผลผลิตของข้าว การศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการใช้ข้อมูลเรดาร์เพื่อจำแนกและทำแผนที่แสดงพื้นที่ปลูกข้าวโดยรวมว่าให้ผลในระดับที่น่าพอใจ แต่ในกรณีที่ต้องการแยกพื้นที่ปลูกข้าวรูปแบบต่างๆ ออกจากกันยังมีข้อจำกัดอยู่ การศึกษาต่อเนื่องเพื่อปรับปรุงเทคนิคให้ดียิ่งขึ้นต่อไปในอนาคตจึงเป็นสิ่งจำเป็น

คำขอบคุณ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนโครงการวิจัย ประเภทอุดหนุนทั่วไป จากมหาวิทยาลัยขอนแก่น

เอกสารอ้างอิง

- เริงศักดิ์ กตเวทิน, จักรพันธ์ เกษระคู, ปาณัฏฐ์ เจริญไธสง, และ อรรถเดช นังตะลา. 2551. การทำแผนที่สิ่งปกคลุมที่ดิน / การใช้ที่ดินในทุ่งกุลาร้องไห้โดยใช้ภูมิสารสนเทศ. แก่นเกษตร 36:185-193.
- เริงศักดิ์ กตเวทิน, และ ปาณัฏฐ์ เจริญไธสง. 2552. จำนวนชุดข้อมูล RADARSAT ที่เหมาะสมสำหรับการประเมินพื้นที่ปลูกข้าวในลุ่มน้ำชี. แก่นเกษตร 37:303-310.
- สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ. 2547. ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ. กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, กรุงเทพฯ.
- สุรัชย์รัตนเสริมพงศ์, สุภาพิศ ผลงาม, และสมเจตน์ประทุมมินทร์. 2547. การประยุกต์ใช้ข้อมูลดาวเทียม RADARSAT ในการคาดคะเนผลผลิตข้าวรายปี: กรณีศึกษาจังหวัดนครนายก. วารสารสมาคมสำรวจข้อมูลระยะไกลและสารสนเทศภูมิศาสตร์แห่งประเทศไทย 4:17-27.
- Bouvet, A., and T. Le Toan. 2011. Use of ENVISAT / ASAR wide-swath data for timely rice fields mapping in the Mekong River Delta. Remote Sensing of Environment 115:1090-1101.
- Chakraborty, M., and S. Panigrahy. 2000. A processing and software system for rice crop inventory using multi-date RADARSAT ScanSAR data. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 55:119-128.
- Congalton, R.G., and K. Green. 2009. Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices. 2nd edition. Lewis Publishing, NY.
- Guo, H. 2001. Radar Remote Sensing Applications in China. Taylor and Francis, London.
- Kaojarern, S. 2000. Rice Ecosystem Mapping and Soil Moisture Monitoring for Rainfed Lowland Using Radar Remote Sensing in Northeastern Thailand. Ph.D. Thesis. Asian Institute of Technology, Pathumthani.
- Lacoul, M., K. Honda, R. Yokoyama, and G. Saito. 1998. Monitoring and assessing rice crop with multi-temporal RADARSAT fine beam mode data in Pathumthani and Ayutthaya province of Thailand. Available: <http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/2002/sol/253.pdf>. Accessed Aug. 20, 2007.

- Li, X., and A.G. Yeh. 2004. Multitemporal SAR images for monitoring cultivation systems using case-based reasoning. *Remote Sensing of Environment* 90: 524-534.
- Liew S. C., S. P. Kam, T.P. Tuong, P. Chen, V. Q. Minh, and H. Lim. 1998. Application of multi-temporal ERS-2 synthetic aperture radar in delineating rice cropping systems in the Mekong River Delta, Vietnam. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 36:1412-1420.
- Lillesand, T.M., and R.W. Kiefer. 2004. *Remote Sensing and Image Interpretation*. 5th edition. John Wiley and Sons, Inc., NY.
- Oza, S.R., S. Panigraphy, and J.S. Parihar. 2008. Concurrent use of active and passive microwave remote sensing data for monitoring of rice crop. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 10: 296-304.
- PCI. 1994. *Manual of PACE Multispectral Analysis Version 5.3*. PCI Inc., ON.
- Shao. Y., X. Fan., H. Liu., J. Xiao., S. Ross., B. Brisco., R. Brown., and G. Staples. 2001. Rice monitoring and production estimation using multi-temporal RADARSAT. *Journal of Remote Sensing of Environment* 76: 310-325.